

# Fuente de alimentación resonante para luminarias LED de alta potencia

## Resumen

En este trabajo se evalúan las prestaciones que ofrece una fuente de alimentación resonante LLC orientada a la aplicación de la iluminación de exteriores mediante LED.

Como punto de partida se expone la actual situación del mercado de la iluminación LED a nivel mundial así como las ventajas en comparación con otros sistemas de alumbrado. Posteriormente se detalla el recorrido histórico y las características particulares que hacen del diodo LED un elemento con gran potencial de cara al futuro.

Mediante un análisis de mayor profundidad se caracteriza el diodo LED elegido para la construcción de una luminaria que servirá de carga para realizar los ensayos de la fuente de alimentación diseñada. A continuación se describe la realización de un prototipo de luminaria y los resultados experimentales obtenidos.

Una vez establecidas las características necesarias para la luminaria empleada como carga se pasa al estudio de las etapas de alta densidad de potencia. Primero se realiza el diseño de una etapa LLC como fuente de tensión así como el cálculo de todos los elementos necesarios para la construcción de un prototipo. El siguiente paso es el estudio de una etapa LLC como fuente de corriente. Se concluye con ensayos experimentales del conjunto Luminaria-Fuente.

## Contenidos

Resumen.....	1
Contenidos .....	2
1 Introducción y objetivos .....	4
1.1 Sistemas de alumbrado. El mercado de la iluminación .....	4
1.2 Alumbrado con LEDs. Potencialidades. Parámetros característicos. Potencias, corrientes, fabricantes.....	6
1.3 Objetivos del trabajo de Master .....	10
2 Caracterización de un LED a partir de su característica V-I.....	14
2.1 Modelo analítico .....	14
2.2 Modelo de simulación.....	14
2.3 Parámetros del LED seleccionado .....	16
3 Prototipo de Luminaria de 100W .....	18
3.1 Medida de las características eléctricas del prototipo.....	18
3.2 Caracterización térmica.....	19
4 Opciones de esquemas de alimentación.....	23
4.1 Una sola etapa con PFC.....	23
4.2 Dos etapas: PFC y fuente de corriente .....	24
5 Etapas de alta densidad de potencia .....	25
5.1 Etapa LLC como fuente de tensión.....	26
5.1.1 Esquema .....	26
5.1.2 Ganancia de tensión.....	27
5.1.3 Graficas de ganancia en Mathcad. Calculo de los elementos. ....	31
5.1.4 Modelo de simulación .....	34
5.1.5 Diseño del PCB .....	34
5.1.6 Ensayos del circuito .....	36
5.2 Etapa LLC como fuente de corriente.....	37
5.2.1 Esquema .....	37
5.2.2 Modelo de simulación .....	38
5.2.3 Ensayos del circuito .....	39
6 Conclusiones.....	43
Anexos .....	44
Anexo I: Cálculo de los elementos de una fuente de tensión LLC .....	44
Anexo II: Montaje luminaria.....	49

Anexo III Caracterización eléctrica experimental de la curva del diodo .....	52
Anexo IV Modelos de simulación en PSIM .....	57
Anexo V Placa prototipo esquemático .....	59
Anexo VI Algoritmo en C para la simulación analítica en PSIM del diodo .....	60
Anexo VII Modelo PSIM caracterización analítica del LED .....	62
Bibliografía .....	63

# 1 Introducción y objetivos

## 1.1 Sistemas de alumbrado. El mercado de la iluminación

La iluminación mediante el uso de tecnología LED (Light-Emitting Diode) es una solución ampliamente extendida en prácticamente todos los campos en los que se requiera una fuente de luz. En el mundo actual en el que vivimos hemos asimilado como habitual la presencia de los LEDs ya que se encuentran presentes en aplicaciones tan dispares como la señalización vial, el alumbrado doméstico o la automoción.

Este éxito tan repentino por encima de otros sistemas de iluminación se basa en las características propias de los LED, las cuales han conseguido desplazar en relevancia incluso a las lámparas de bajo consumo, por no hablar de las, ya casi extintas en muchos países, lámparas de incandescencia, condenadas a la desaparición a medio plazo. El único tipo de lámpara que se espera pueda perdurar es la fluorescente, debido a su fiabilidad y su ya alta eficiencia energética, las cuales le permiten contar con el apoyo del consumidor como una forma conocida y confiable de iluminación.

Para poder tener una visión en perspectiva del corto plazo en el que ha tenido lugar la revolución LED podemos resumir su historia en unos pocos hitos:

**1960** -Nick Holonyak crea el primer LED capaz de emitir luz en el espectro visible. Se le conoce como el padre del diodo emisor de luz

**1970** -Fairchild Optoelectronics comercializa LEDs a un precio inferior a los 5 cent. €. Uso común en pantallas de calculadoras electrónicas.

**1980** –Se desarrollan mejoras en eficiencia y brillo, se extiende su uso.

**1990** -En 1994 Shuji Nakamura presenta el primer LED azul de alto brillo basado en el Nitruro de Galio e Indio, InGaN, el cual dará lugar al LED de luz blanca. Por esta invención será premiado en 2006 con el Millennium Technology Prize [1]

**Actualidad** –La tecnología LED es usada masivamente y se han alcanzado valores cercanos a los 200 lúmenes por vatio en laboratorio, haciéndola apta para resolver casi cualquier problema de iluminación. [2]

Según las previsiones actuales la aparición de la iluminación mediante LED puede suponer una revolución similar a la que tuvo lugar en los años 30 cuando se comercializó la lámpara fluorescente. Se estima que el cambio que se va a producir en la industria de la iluminación en los próximos 5 años será mayor que el que hemos presenciado en los últimos 50. En el plazo de una década habrá conseguido hacerse con algo más del 50% del mercado global. Como dato esclarecedor las ganancias debido a la tecnología LED han supuesto unos 54 billones de dólares en 2012 aunque no se espera que este nivel se mantenga sino que se irá reduciendo hasta unos 30 billones en 2021 debido a la larga vida útil de este tipo de lámparas que hará que el mercado sufra una desaceleración.

En la Fig. 1 se puede apreciar la disminución prevista de beneficios que se producirá en 2013 y los años siguientes en los diferentes mercados.

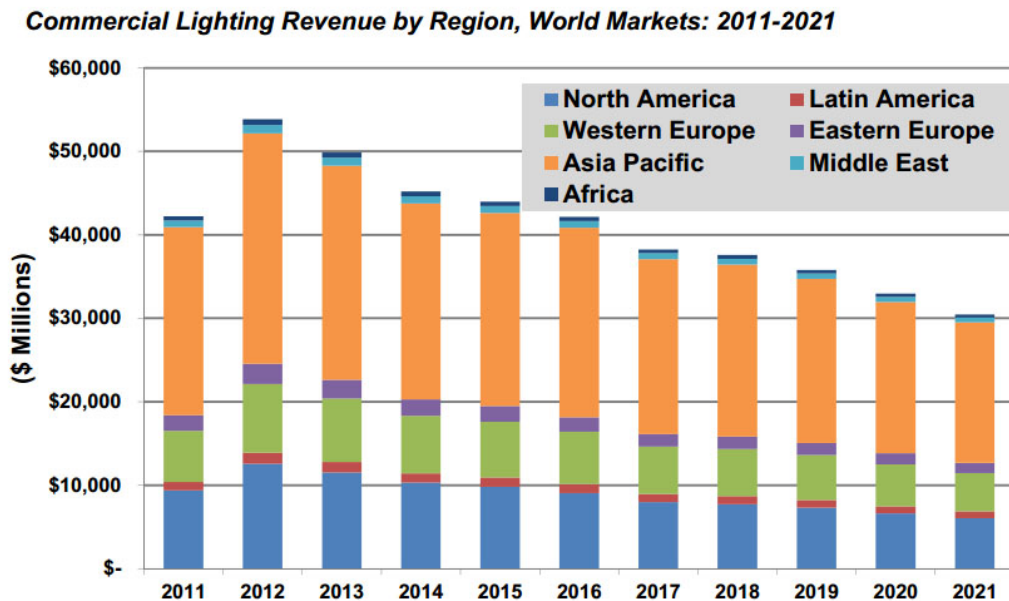


Fig. 1. Ingresos por regiones en el mercado de la iluminación, 2011-2021 [3]

La cuota de mercado aproximado del LED era de un 2% en 2011 pero las previsiones estiman que alcanzara hasta un 52% en la próxima década, por el contrario las lámparas incandescentes y los tubos fluorescentes menos eficientes como los T8 y T12 habrán reducido su presencia drásticamente.

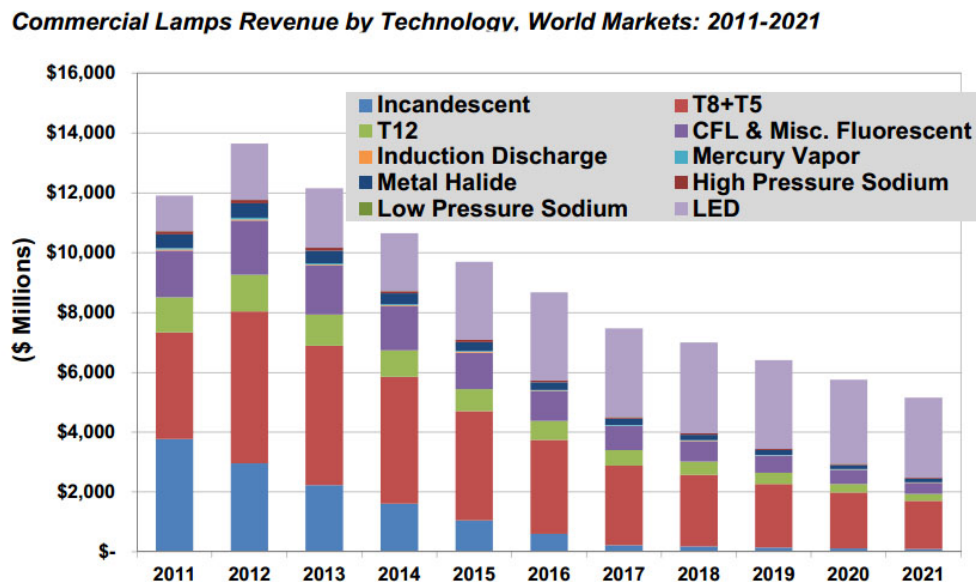


Fig. 2. Ingresos por tipo de tecnología en el mercado de la iluminación, 2011-2021 [3]

Su amplia implantación y el previsible aumento de la demanda harán que los costes de esta tecnología se reduzcan entre un 80 y un 90% en la próxima década, tal como muestra la Fig. 2. Los cálculos estiman que el ahorro potencial es global es enorme, en un país como Estados

Unidos el cual representa el 20% del consumo mundial de energía eléctrica, representaría 40 mil millones de dólares por año. [4]

## 1.2 Alumbrado con LEDs. Potencialidades. Parámetros característicos. Potencias, corrientes, fabricantes

Comparativamente la iluminación mediante LEDs presenta unas incontestables ventajas respecto a los sistemas de iluminación usados en el último siglo en cuanto a una serie de parámetros.

### -Gran valor de Lm/W

La luz es energía electromagnética cuya longitud de onda está en el rango visible. La Fig. 3 muestra que solamente una pequeña parte de la energía aplicada se transforma en luz.



Fig. 3. Pérdidas de energía

Una fuente de luz queda caracterizada por la energía de su espectro. Al ser una energía, se puede medir en unidades del sistema internacional. Para ello necesitamos un instrumento de medida capaz de traducir la radiación en vatios, se trata de un instrumento radiométrico. Si utilizamos el ojo como sensor, debido a que se comporta como un filtro paso banda, la potencia radiométrica se traduce en una menor potencia ocular detectada, que llamaremos potencia fotométrica. Para comparar ambas escalas radiométrica y fotométrica utilizamos 1W (información radiométrica) de radiación verde de 555nm y le asignamos un valor de 683 Lúmenes (información fotométrica).

El término Lm/W relaciona el flujo luminoso, o número de lúmenes emitidos, y los vatios de potencia consumida. En comparación, una bombilla basada en tecnología LED puede iluminar lo mismo que una convencional utilizando potencia hasta 10 veces menor. [5]

En laboratorio se han alcanzado valores de hasta 170 Lm/W [6]

### **-Alto CRI**

El CRI, o “color rendering index”, típico de una luminaria LED es de un valor próximo a 90. El CRI es una medida que cuantifica de cero a cien la capacidad de una fuente de luz de reproducir los colores fielmente en comparación con una fuente de luz ideal. Se considera como luz ideal la que es similar a la emitida por un cuerpo negro a 6000°K. [5]

### **-Larga vida útil**

La vida útil de un LED es un valor que no se mide por el número total de horas que puede estar encendido antes de apagarse, si no por el número de horas que es capaz de estar encendido emitiendo un flujo luminoso superior al 70% del valor inicial. El valor medio de vida de un LED indicado por los fabricantes es de unas 50.000 horas, el cual suele venir limitado no por la vida del LED en sí, si no por otros componentes como la fuente de alimentación y el recubrimiento plástico de la óptica. Una buena disipación del calor es fundamental para tener una vida útil lo más prolongada posible.

### **-CCT**

Si el color de una fuente de luz es prácticamente similar al color que adquiere el cuerpo negro a temperatura T se dice que la temperatura de color de esta fuente de luz es T. La distribución espectral del cuerpo negro viene dada por la ley de Plank

$$P(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}$$

Donde T es la temperatura absoluta del cuerpo negro,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $C_1$  y  $C_2$  son constantes.  $P(\lambda, T)$  representa el flujo radiante emitido por unidad de área y por intervalo de longitud de onda. Un LED da un espectro diferente de el del cuerpo negro. Aquella temperatura del cuerpo negro cuyo color es próximo al del LED se denomina como CCT, correlated color temperature.

### **-Angulo de emisión**

Angulo de emisión es aquel en que, con respecto a la dirección de máxima radiación, la intensidad se reduce un 50%.

### **-Encendido instantáneo**

A diferencia de otros sistemas de iluminación, la tecnología LED ofrece desde el mismo instante en que se enciende, color constante y luz máxima. Esta característica lo hace óptimo para la iluminación de lugares en los que se enciende y apaga la luz con mucha frecuencia o en los que se requiere una respuesta rápida.

### -Funcionamiento a baja tensión

Debido a su alta eficiencia los LED son capaces de funcionar usando tensiones muy bajas y generar unos resultados similares a lámparas tradicionales con un consumo de potencia mucho mayor. Para obtener esas tensiones de funcionamiento se ha de recurrir a etapas transformadoras de tensión que adapten la tensión de alimentación a los valores requeridos.

En resumen, tras conocer sus parámetros característicos podemos apreciar que el uso de LEDs para iluminación tiene unas claras ventajas como son: gran fiabilidad, mayor eficiencia energética, robustez constructiva debido a su simplicidad, versatilidad al permitir su implementación en todo tipo de situaciones, capacidad de dar una respuesta rápida y como consecuencia de todo lo anterior un menor impacto ecológico.

Para completar esta visión sobre la tecnología LED detallaremos los componentes básicos de un LED típico y las características que nos ofrece el fabricante sobre el LED elegido para este proyecto.

La anatomía básica de un LED común según nos detalla el fabricante Phillips se muestra en la Fig. 4:

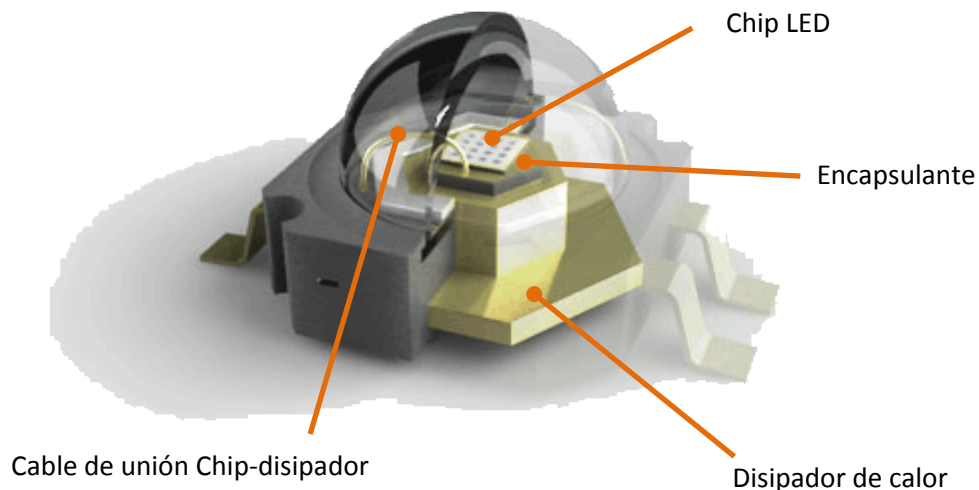


Fig. 4. Sección de un diodo LED común [2]



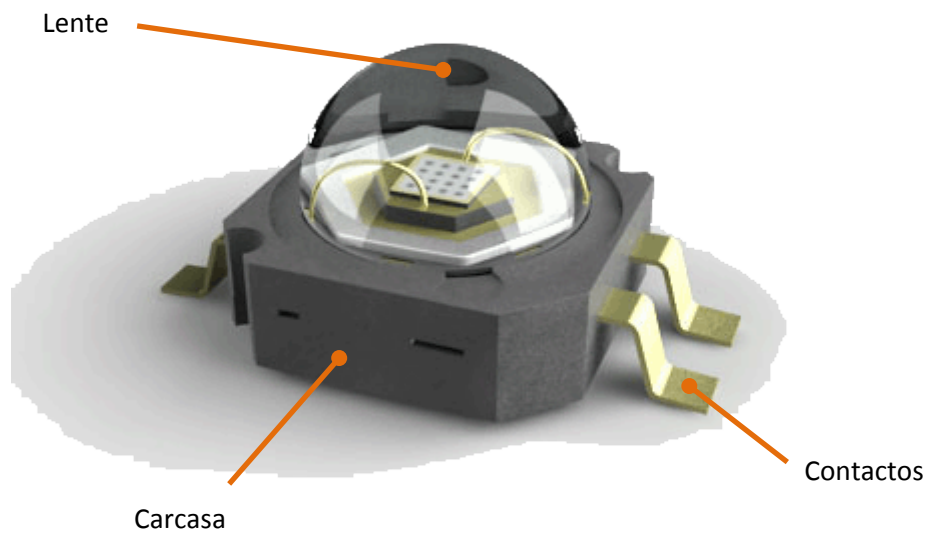


Fig. 5. Diodo LED común [2]

Como se aprecia en las Fig. 4 y Fig. 5 la estructura un LED está compuesta por unos elementos básicos que, si bien pueden variar en diseño y morfología, en líneas generales son comunes a todos los dispositivos de este tipo.

En el núcleo encontramos el chip LED el cual al ser sometido al paso de una corriente emitirá luz, este chip está rodeado por un encapsulante que permite pasar la luz y que separa al chip de la estructura metálica utilizada para disipar el calor. El chip se conectara a esta estructura usando unos pequeños cables de unión. En función de las características del LED puede llegar a ser necesario un disipador mayor, que radie el calor al exterior. Este factor es crítico ya que la vida útil y prestaciones de estos dispositivos van relacionadas de forma directa con la temperatura de funcionamiento. Básicamente el objetivo es que la luz sea radiada por la parte superior y el calor conducido por la inferior.

Finalmente todo el producto está rodeado de una carcasa de la que surgen sus contactos eléctricos y en la parte superior se encuentra una lente que concentra el haz de luz direccionándolo hacia el exterior.

Como ejemplo real utilizaremos uno de los modelos de LED del fabricante Multicomp, el cual es el dispositivo elegido para las pruebas realizadas en este proyecto.

Las características principales del chip LED seleccionado se muestran en la Tabla I y en la Fig. 6.

Tabla I. Características diodo LED Multicom 703-0142 [7]

<b>Fabricante:</b>	<b>MULTICOMP</b>
<b>Referencia fabricante:</b>	703-0142
<b>Color:</b>	Blanco polar
<b>CCT:</b>	5000K
<b>Flujo Luminoso @ Max:</b>	143 LM
<b>Corriente Forward @ Test:</b>	350 mA
<b>Corriente Forward @ If Max:</b>	700 mA
<b>Voltaje Forward @ If Max:</b>	4 V
<b>Potencia disipada:</b>	1 W
<b>Angulo de emisión:</b>	130º
<b>Tipo de montaje:</b>	SMD
<b>Rango de temperatura de operación:</b>	-40°C a +75°C

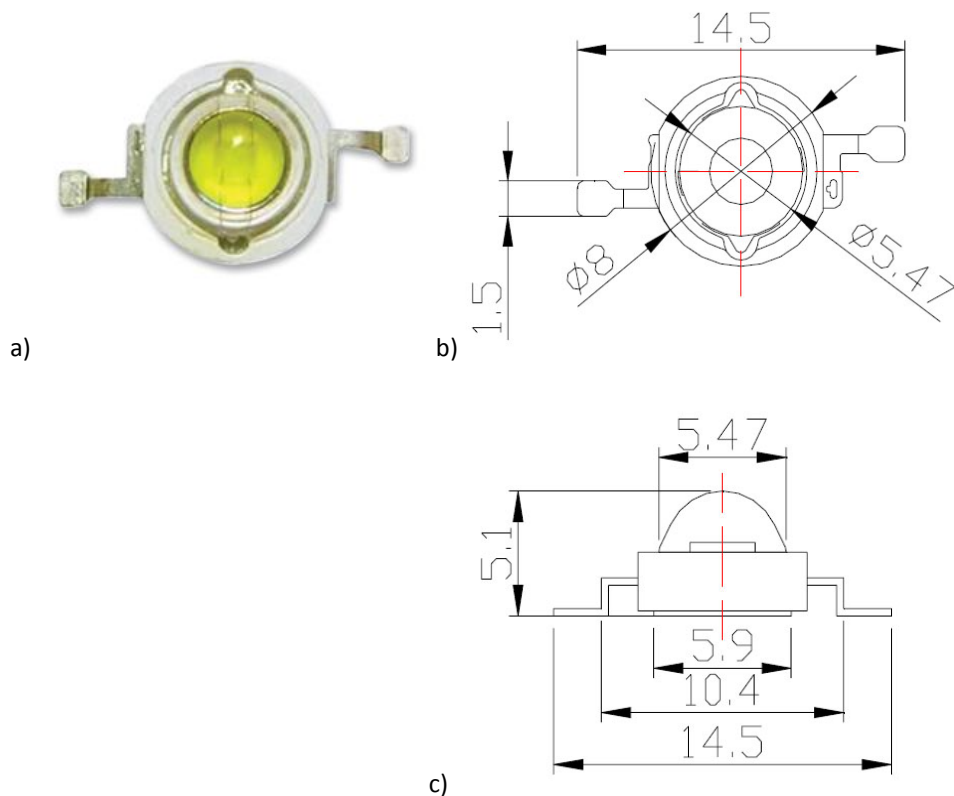


Fig. 6. Apariencia real, planta y perfil del diodo LED utilizado. Medidas en mm. [7]

### 1.3 Objetivos del trabajo de Master

Tras la presentación de los parámetros relevantes de los LED pasaremos a ocuparnos del tema que trata este proyecto: el diseño de una fuente de corriente para luminarias basadas en este tipo de componente.

Para conocer el comportamiento de la carga que con la que va a tener que trabajar la fuente, se requiere:

- a) Elaborar un modelo analítico que permita identificar un tipo de LED comercial cualquiera.
- b) Un modelo de simulación que incluya el efecto de la temperatura.
- c) Un método de extracción de los parámetros del modelo a partir de la información de los fabricantes.

Los resultados se utilizarán para incluir el modelo de LED en estudio en un simulador que incluya también la fuente diseñada.

Los LED debido a sus características son normalmente conectados en serie (Fig. 7) ya que de esta manera se asegura que una  $I_f$  de un valor determinado recorre todos los dispositivos de la rama. La corriente  $I_f$ , o corriente directa, es la corriente necesaria para que un LED reproduzca las condiciones nominales de iluminación, al ser todos los dispositivos iguales, esta tendrá el mismo valor para todos.

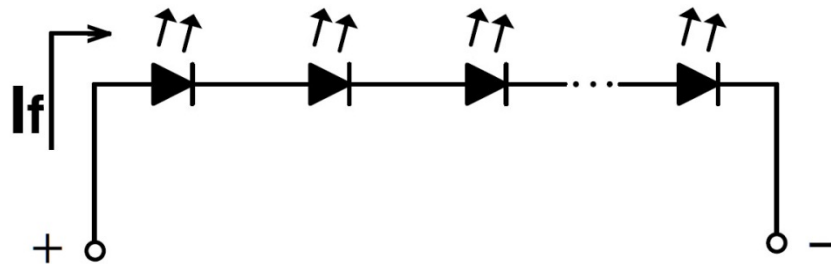


Fig. 7. Representación de la corriente directa

Los circuitos integrados destinados a la alimentación de LEDs han de ser capaces de generar una corriente y tensión altas para gobernar alta potencia. En las tablas II y III se muestran las características de una muestra de los circuitos disponibles en el mercado.

-Circuitos integrados convertidores AC-DC:

Tabla II. Características de convertidores AC-DC [8]

	Vac input max	Vdc output max	I output max	Potencia	Model
National Semiconductors	230V	60V	700mA	100W	LM3450
Power Integrations	135V	90V	200mA	18W	DER-323
Texas instruments	135V	21V	350mA	8W	TPS92310
Linear Technology	265V	125V	1.1A	100W	LT3799

-Circuitos integrados convertidores DC-DC:

Tabla III. Características de convertidores DC-DC [8]

	Vdc input max	Vdc output max	I output max	Potencia	Model
National Semiconductors	75V	42V	2.5A	70W	LM3429
OnSemiconductor	40V	22V	3A	70W	NCP3065
Linear Technology	80V	80V	2.5A	90W	DC1521A

En resumen, las necesidades propias de los sistemas LED han hecho que las fuentes se hayan desarrollado buscando obtener la mayor potencia posible. No obstante tal como indican las tablas, las potencias están limitadas a 100W. A día de hoy existe una gran cantidad de opciones a la hora de elegir fuentes de corriente, pudiendo ser fuentes con PFC (capacidad de corrección del factor de potencia) o sin ella.

Por lo tanto, y a la vista de las limitaciones de potencia de los circuitos integrados comerciales, el objetivo principal de este proyecto es diseñar una fuente de intensidad constante para una potencia de 100W, estableciendo las bases de diseño para el caso de potencias superiores. Como la tecnología de fuentes de tensión está muy consolidada, la idea será aprovechar los esquemas de fuentes de tensión existentes para transformarlos en fuentes de corriente orientadas a la alimentación de luminarias LED.

Como punto de partida tomaremos las etapas de alta densidad de potencia, las cuales estudiaremos en su versión como fuente de tensión y realizaremos su transformación en fuente de corriente. A través de esquemas y cálculos desarrollaremos modelos de simulación para al final aplicar lo simulado construyendo un prototipo con el que alimentaremos una luminaria compuesta por 98 elementos de los LEDs mencionados anteriormente. La configuración de los LEDs será de siete ramas en paralelo con catorce elementos por cada rama (Fig. 8), los cuales irán montados sobre un radiador metálico para disipar el calor generado.

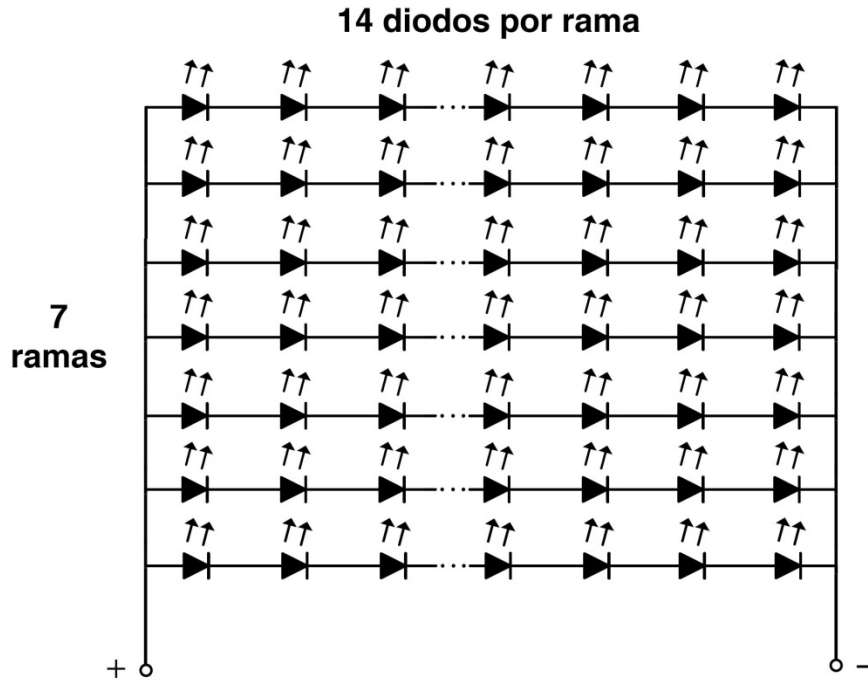


Fig. 8. Esquema de la luminaria prototipo, 7x14=98 LEDs

Realizando unos cálculos previos podemos estimar cual será la tensión y corriente limite a no superar para el correcto funcionamiento de la luminaria. Para ello usaremos sus valores máximos de operación.

$$I_{fmax} = 700 \text{ mA/rama} * 7 \text{ ramas} = 4,9 \text{ A}$$

$$V_{fmax} = 4 \text{ V/LED} * 14 \text{ LEDs} = 56 \text{ V}$$

$$P_{max} = 1 \text{ W/LED} * 98 \text{ LEDs} = 98 \text{ W}$$

En funcionamiento normal, sus condiciones nominales establecen los valores que debe atender la fuente de alimentación

$$P_{nom} = I_f * V_f = 350 \text{ mA} * 3 \text{ V} * 98 \text{ LEDs} = 105 \text{ W}$$

$$V_{nom} = 3 \text{ V/LED} * 14 \text{ LEDs} = 42 \text{ V}$$

$$I_{nom} = 350 \text{ mA/rama} * 7 \text{ ramas} = 2,45 \text{ A}$$

## 2 Caracterización de un LED a partir de su característica V-I

### 2.1 Modelo analítico

Para estudiar el LED elegido analizaremos la naturaleza de este tipo de dispositivo, para ello nos centraremos en una de sus principales características y analizaremos la relación que tiene con la temperatura.

La dependencia de la corriente de saturación inversa  $I_o$  con la temperatura  $T$  viene dada por:

$$I_o = KT^m e^{\frac{-V_{GO}}{\eta V_T}}$$

En la que  $K$  es la constante de Boltzman,  $m$  el coeficiente de temperatura de la corriente de saturación inversa,  $V_{GO}$  la tensión del gap de la unión a 300°K,  $\eta$  el factor de eficiencia y  $V_T$  la tensión equivalente de temperatura.

En nuestro caso estamos tratando con un diodo formado por una combinación de InGaN el cual tiene una se caracteriza por tener una tensión del gap de la unión a 300°K de  $V_{GO} = 2,95V$ . Para las simulaciones realizadas se ha supuesto que  $V_{GO}$  es constante aunque éste varía con la temperatura.

Esta relación con la temperatura también se observa en otro término de la característica tensión-corriente del diodo, concretamente en la ecuación:

$$I = I_o(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1)$$

En esta expresión  $V$  tendrá valor positivo si esta polarizado en sentido directo. Si esta tensión  $V$  es positiva y varias veces superior a  $V_T$  podemos despreciar el 1 en el paréntesis.

### 2.2 Modelo de simulación

Para simular el diodo elegido tomaremos los datos del fabricante y trataremos de crear un modelo que se ajuste lo más fielmente posible al comportamiento del diodo. La información que nos proporciona el fabricante es la gráfica de la relación entre tensión y corriente en un ensayo realizado con temperatura de capsula 25°C, concretamente la siguiente gráfica V-I (Fig. 9).

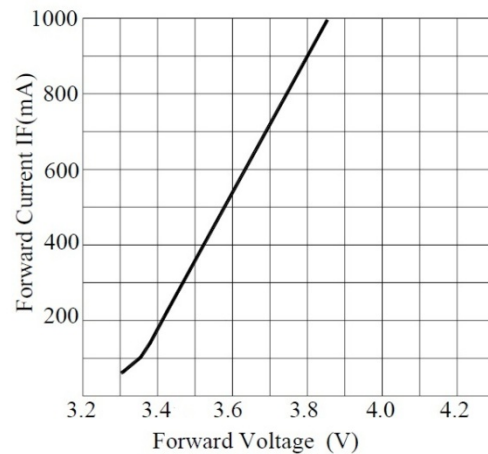


Fig. 9. Relación V-I en un ensayo a 25°C del diodo LED utilizado [7]

Para completar la información que necesitamos nos ayudaremos de una simulación eléctrica realizada en PSIM que modela un LED utilizando su ecuación analítica. Mediante la variación de sus parámetros relevantes, compararemos su comportamiento con el representado en la gráfica del fabricante hasta conseguir un ajuste lo suficientemente fiel.

En la Fig. 10 se muestra el esquema implementado

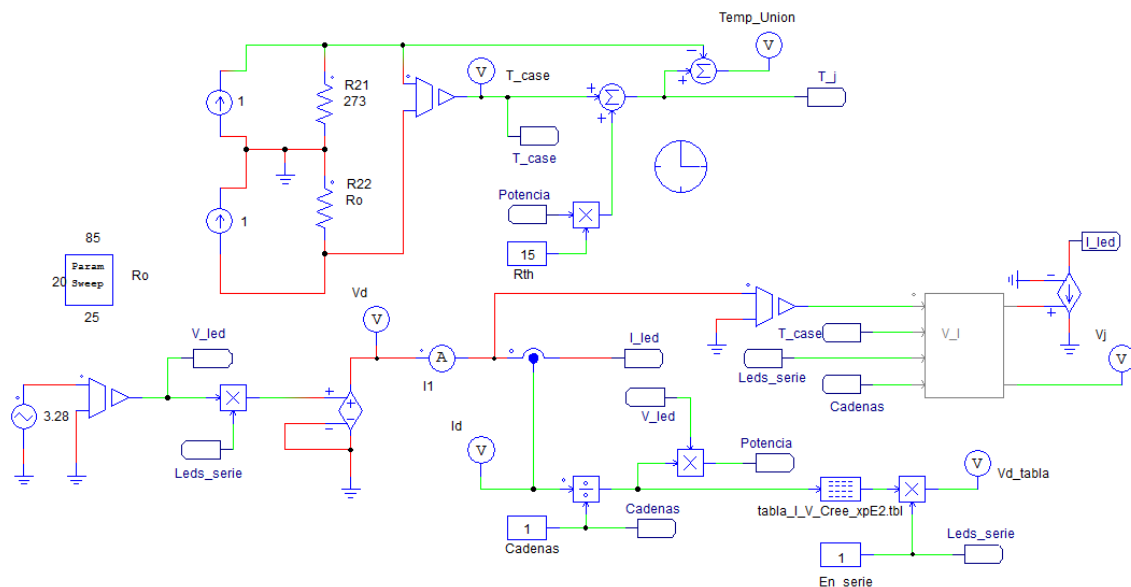


Fig. 10. Esquema PSIM del circuito utilizado para la caracterización analítica de un LED

En este esquema se calcula la relación V-I a partir de cuatro parámetros: la temperatura de la unión  $T_j$ , la tensión aplicada a la cadena de LEDs, el número de LEDs en serie y el número de cadenas.

La Fig. 11 muestra la gráfica V-I obtenida, donde el eje X representa la corriente y el eje Y la tensión aplicada sobre el LED. La línea azul representa la relación entre tensión y corriente que nos da el fabricante y la línea roja es la aproximación que hemos utilizado para el cálculo.

El criterio de ajuste es el siguiente: el codo de la curva se ajusta con la intensidad de saturación inversa a la temperatura de referencia, de tal manera que subiendo la intensidad de saturación

inversa baja la posición del codo de la curva. El ajuste de la pendiente se realiza con el valor de la resistencia serie. El aumento de la resistencia se traduce en un aumento de la pendiente.

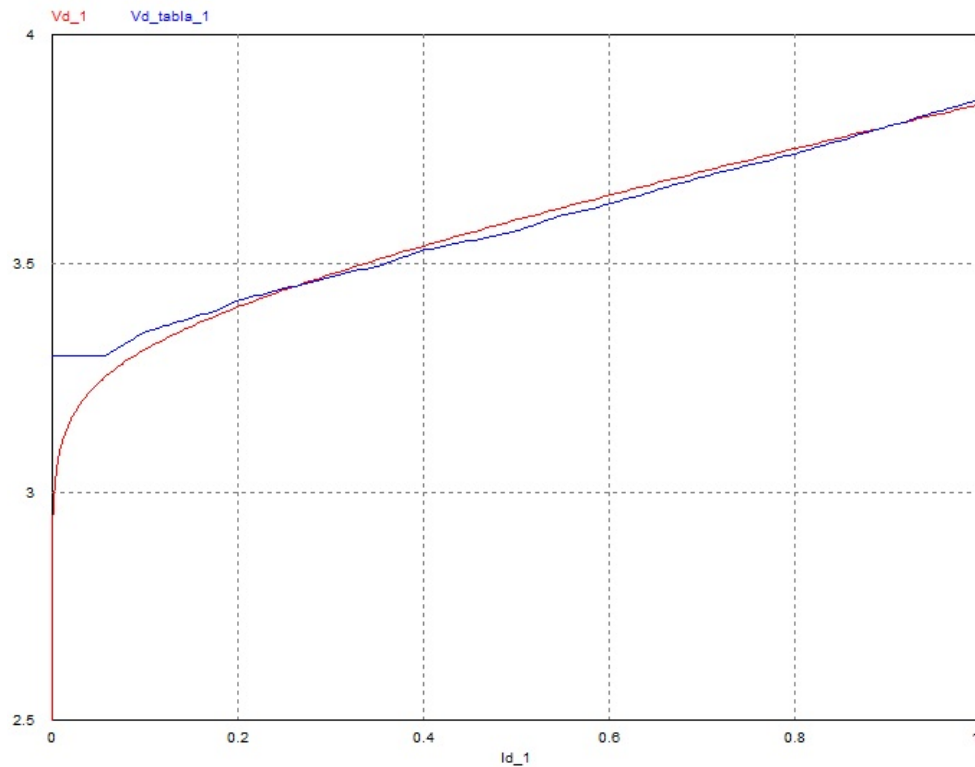


Fig. 11. Comparación entre las características V-I del fabricante (azul) y de la ecuación analítica (rojo), obtenidas con una temperatura de la unión de 25°C

En el Anexo VI se muestra el algoritmo que modela en código C el bloque que simula analíticamente el diodo.

### 2.3 Parámetros del LED seleccionado

Una vez realizada la simulación y el ajuste de parámetros se obtienen los valores siguientes:

Factor de eficiencia propio del InGaN:

$$\eta = 3$$

Resistencia serie del diodo:

$$R_s = 400 * E - 3 \Omega$$

Resistencia paralelo del diodo:

$$R_p = 1 * E6 \Omega$$

Corriente de saturación inversa en ensayo a 25°C:

$$I_{s25} = 40 * E - 21 A$$

Coefficiente de temperatura de la corriente de saturación inversa:



$$m = 15 * E - 1$$

Tensión del gap del InGaN/Sapphire

$$V_{GO} = 3,42V$$

-Análisis de los resultados:

Los parámetros resultantes del ajuste dan lugar a una tensión de gap  $V_{GO} = 3,42V$  que resulta exagerado con respecto a la información facilitada en la literatura en que  $V_{GO} = 2,95V$ . Ello indica que la curva facilitada por el fabricante es errónea. Para confirmarlo se realiza un ensayo eléctrico a una cadena de 13 LEDs en serie. En el Anexo III se describe el proceso de caracterización eléctrica en PSIM que se ajusta a los datos experimentales.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$\eta = 3 \quad R_s = 248 * E - 3 \Omega \quad R_p = 1 * E 6 \Omega$$

$$I_{s85} = 98 * E - 6 A \quad m = 15 * E - 1 \quad V_{GO} = 2,95 V$$

Con estos valores disponemos de un modelo de simulación del LED con el que podemos reproducir escenarios de funcionamiento y obtener el modelo de luminaria con los 98 LEDs ya que el modelo permite además simular una cadena de LEDs en serie y la conexión de varias cadenas en paralelo.

Asimismo se puede incorporar el modelo de la luminaria en un esquema PSIM que incluye el modelo de la fuente al completo para comprobar las especificaciones de diseño sin necesidad de usar el montaje físico real.

### 3 Prototipo de Luminaria de 100W

El prototipo de luminaria que se ha construido como carga para la etapa de alimentación diseñada y construida en este proyecto consiste en una placa de circuito con 7 ramas con 14 LEDs en cada una, con una potencia total de aproximadamente 100W. Para el correcto funcionamiento de la luminaria es necesario evacuar el calor generado, por ello la placa de circuito va acoplada a un radiador de aluminio. Para la construcción de este prototipo se han realizado una serie de ensayos para establecer cuáles eran las dimensiones adecuadas de los elementos del montaje.

#### 3.1 Medida de las características eléctricas del prototipo

La medida de las características eléctricas fue realizada alimentando el prototipo con corriente constante (Fig. 12). Para ello se usa la simulación para reproducir los valores del ensayo y para estimar el comportamiento en otras condiciones.

Para llevar a cabo las pruebas experimentales se ha conectado la luminaria a una fuente de potencia y se la ha sometido a una corriente de 2,45A con una tensión resultante de capsula de unos 45V obteniendo la siguiente tabla:

Tabla IV. Datos recogidos en el ensayo de la luminaria prototipo

Tiempo (s)	Tensión (V)	intensidad (A)	Potencia (W)	Temperatura (°C)
0	45,5	2,451	111,5205	21,70
120	45,2	2,451	110,7852	24,13
480	44,7	2,451	109,5597	42,38
660	44,6	2,451	109,3146	49,11

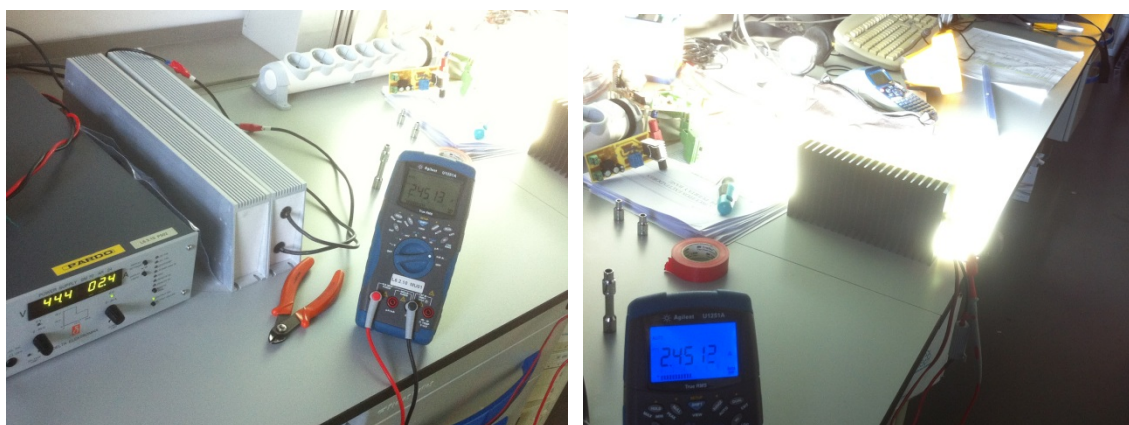


Fig. 12. Montaje ensayo luminaria prototipo

Como se puede apreciar conforme se produce el aumento de la temperatura la tensión baja ligeramente y con ella la potencia, ello se debe a que la tensión de la unión se reduce con la temperatura.

### 3.2 Caracterización térmica

La evolución de la temperatura se modela con un transitorio de primer orden que se mantiene en el tiempo hasta que alcanza un punto en el que se hace fija y alcanza un valor estacionario. A la hora de hacer este ensayo experimental se utilizan dos termopares colocados en el radiador en posición simétrica y además se ha controlado la aparición de puntos críticos mediante una cámara termográfica.

El control de temperatura mediante la cámara termográfica (Fig. 13) reveló que ciertos LEDs no disipaban bien el calor que generaban calentándose más que el resto, alcanzando temperaturas cercanas a los 75°C que marca el fabricante como temperatura máxima de operación. Esto se debe a que la diferencia de presión debida al apriete de los tornillos ha dado lugar a una resistencia térmica local superior en ciertos puntos.

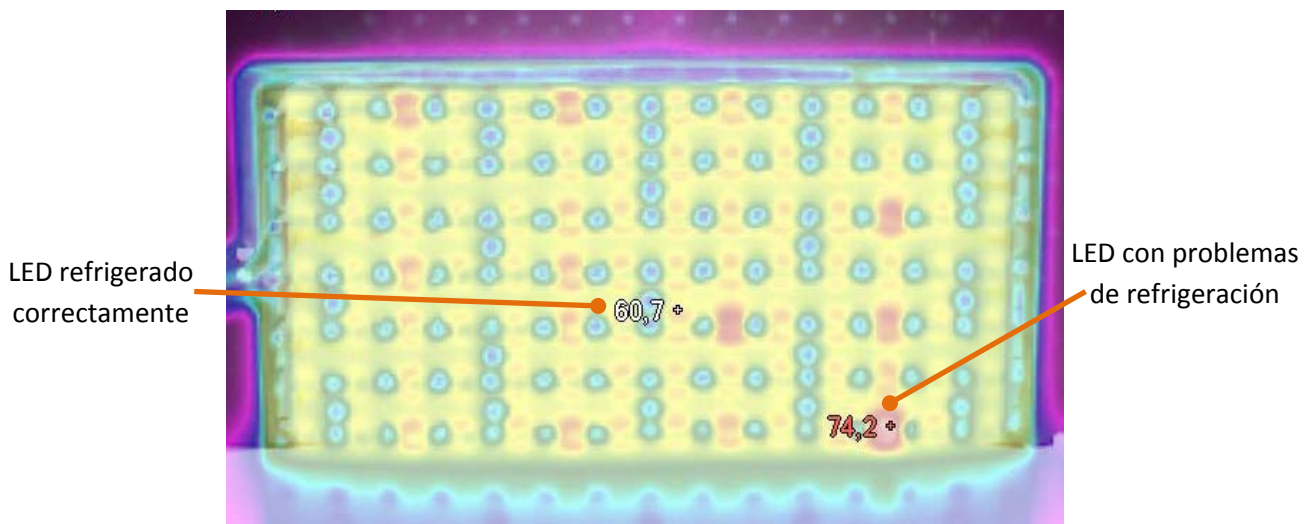


Fig. 13. Imagen termográfica de la luminaria prototipo durante el ensayo

Este ensayo también arroja la siguiente información:

- La temperatura de un LED bien refrigerado es de unos 2 grados por encima de la temperatura del radiador.

- El LED más crítico se encuentra a 12 grados por encima de la temperatura del radiador. Esto nos indica que el contacto con el radiador ha de ser lo más uniforme posible ya que un LED mal acoplado en una prueba real se habría calentado hasta quemarse.

Dado que las limitaciones del prototipo no nos permitieron alcanzar el punto en el que la temperatura se estabiliza utilizamos los datos recogidos durante el ensayo para realizar una estimación.

Para el cálculo de la característica térmica del radiador representamos gráficamente la variación de temperatura a lo largo del tiempo recogida por los dos termopares.

## Ensayo Térmico Radiador Luminaria

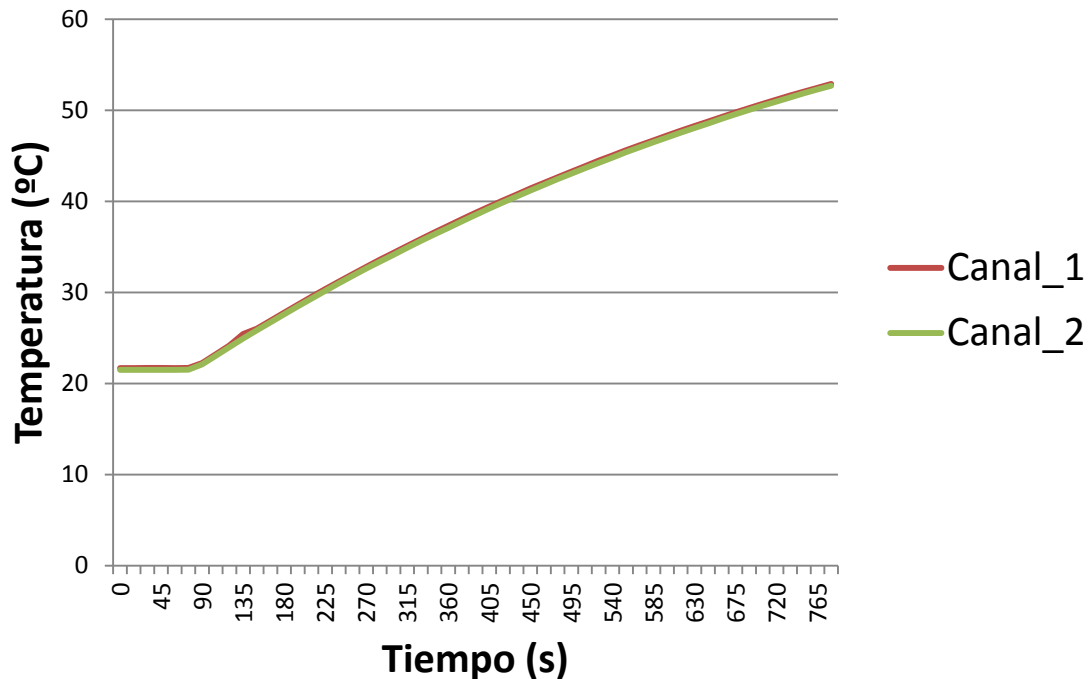


Fig. 14. Variación de la  $T^a$  frente al tiempo medida en los dos termopares acoplados al radiador

La Fig. 14 muestra la temperatura alcanzada en función del tiempo. Como era de esperar los dos termopares nos ofrecen unos valores prácticamente idénticos, también podemos apreciar que hasta los 90 segundos de ensayo no se produce ninguna variación de temperatura, esto es debido a que no se comienza a aplicar tensión al sistema hasta ese momento. Este tiempo de 90 segundos será considerado como el 'tiempo cero' en los cálculos.

La caracterización térmica se ha llevado a cabo mediante el uso de la siguiente ecuación que relaciona la temperatura en función del tiempo:

$$T(t) = T_{final} + (T_{inicial} - T_{final})e^{-\frac{(t-t_{cero})}{\tau}}$$

Donde

$T_{final}$  es el valor que alcanza la temperatura cuando el sistema se estabiliza

$T_{inicial}$  es el valor de la temperatura del montaje al inicio del ensayo, o en otras palabras, la temperatura ambiente.

$t$  es el valor del tiempo

$t_{cero}$  es el valor del tiempo desde que comenzamos a tomar datos hasta que conectamos la tensión.

$\tau$  Constante de tiempo térmica

De esta ecuación conocemos el valor de  $T_{inicial}$ ,  $t$ ,  $t_{cero}$  por lo que para realizar el ajuste variaremos el valor de  $T_{final}$  hasta que la representación gráfica sea lo más parecida posible. La Fig. 15 muestra el resultado.

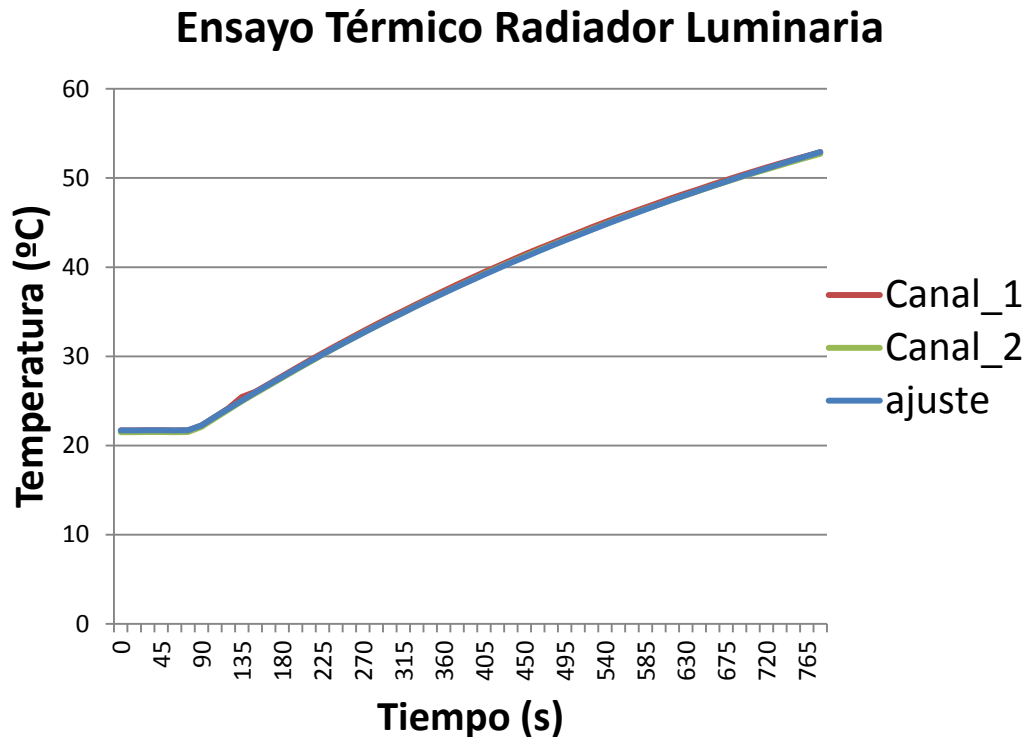


Fig. 15. Variación de la  $T^a$  frente al tiempo medida en los dos termopares acoplados al radiador y grafica del ajuste.

El valor de  $T_{final}$  necesario para alcanzar el ajuste es de  $79,5^{\circ}\text{C}$  y la constante de tiempo es 900s, lo cual nos indica que hemos de aumentar la capacidad disipativa del radiador, ya que la temperatura de capsula máxima de operación de los LEDs según el fabricante es de  $75^{\circ}\text{C}$ . Con este dato podemos calcular cual sería el radiador necesario para poder realizar un ensayo en condiciones nominales sin riesgo de quemar los LEDs, para ello establecemos los siguientes parámetros.

$$T_{\max LED} = 75^{\circ}\text{C}$$

Limitada por el fabricante.

$$T_{\max radiador} = 73^{\circ}\text{C}$$

Dos grados menor que la temperatura del LED, valor deducido experimentalmente.

$$T_{\text{ambiente max}} = 45^{\circ}\text{C}$$

Suponemos una temperatura ambiente extrema.

Para calcular el nuevo radiador partimos del radiador que ya tenemos. El primer dato que calculamos es su resistencia térmica:

$$R_{termica\ 1} = \frac{(T_{final} - T_{inicial})}{Potencia} = \frac{79,5 - 22,25}{111,5205} = 0,51 \frac{^{\circ}C}{W}$$

Ahora a partir de los datos establecidos para el nuevo radiador calculamos la  $R_{termica\ 2}$  del nuevo radiador

$$R_{termica\ 2} = \frac{(T_{final} - T_{inicial})}{Potencia} = \frac{73 - 45}{111,5205} = 0,25 \frac{^{\circ}C}{W}$$

Por lo tanto la relación entre un radiador y otro será

$$\frac{R_{termica\ 1}}{R_{termica\ 2}} = \frac{0,51}{0,25} = 2,04$$

Es decir, que un radiador el doble de grande del que se utilizó para el prototipo permitiría llevar a cabo un ensayo en el que se alcanzara una temperatura final que no supusiera un peligro para los LED.

## 4 Opciones de esquemas de alimentación

### 4.1 Una sola etapa con PFC

A la hora de diseñar el sistema de alimentación para la aplicación que nos ocupa se nos presentan diferentes opciones, la primera de ellas es alimentar el circuito con una sola etapa que incluya un corrector del factor de potencia.

El integrado que analizaremos es el LT3799 del fabricante Linear Technology ya que esta específicamente diseñado para ser utilizado como driver para aplicaciones LED (Fig. 16). Las etapas flyback tienen limitada su capacidad de dar potencia por el elevado valor eficaz de la corriente que se impone sobre el condensador y el diodo de salida. Por ello su uso esta limitado a potencias inferiores a 100W.



Fig. 16. Encapsulado del integrado LT3799 [9]

Este integrado es un convertidor AC-DC flyback con corrector del factor de potencia. Se puede utilizar con potencias de salida desde 4 hasta 100W siendo su tensión de salida limitada por los componentes a los que se conecte. Es una etapa de alta eficiencia, la cual configurada para 220V de tensión de entrada, ofrece un valor de eficiencia de aproximadamente un 84%.

Según podemos ver en las especificaciones del datasheet (Fig. 17) la corriente de salida en cualquiera de las posibles tensiones de entrada y configuraciones alcanza valores ligeramente superiores a 1A.

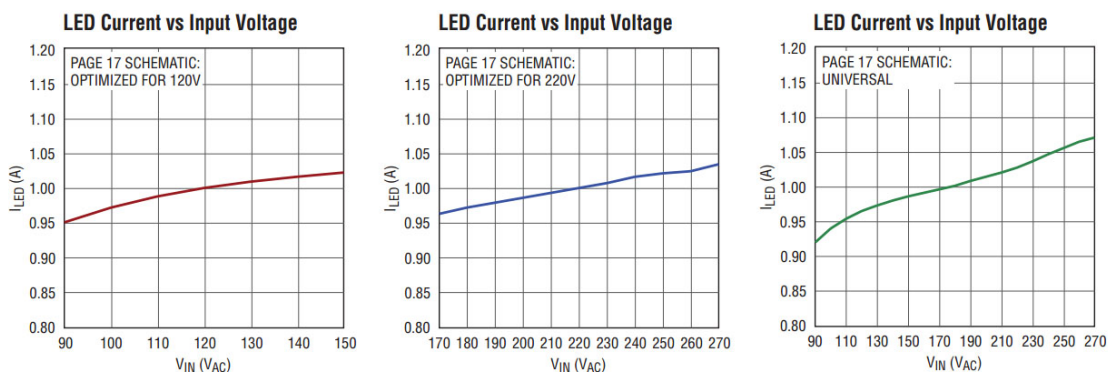


Fig. 17. Graficas de la relación Vin-Iled para diferentes configuraciones [10]

Observando estos datos vemos que a pesar de ser un driver para uso con LED está en el límite de los requerimientos de intensidad calculados anteriormente para nuestro proyecto. No obstante se trata de la mejor opción del mercado para potencias inferiores a 90 W.

En el datasheet se plantean diferentes tipos de configuración (Tabla V) las cuales dependiendo del transformador que se utilice nos van a dar como resultado distintos valores de tensión y corriente a la salida.

Tabla V. Características de los diferentes trafos ofrecidos por el fabricante. [10]

$N_{psa}$	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (A)	$P_{out}$ (w)
1:0.24:0.24	22	1	22
6.67:1:1.67	10	0.4	4
20:1:5	3.8	1.1	4.18
<b>6:1:1</b>	<b>18</b>	<b>5</b>	<b>90</b>
4:1:0.71	28	0.5	14
8:1:1.28	14	1	14
1:1:0.24	85	0.4	34
1:1:0.22	90	1	90
1:1:0.17	125	0.32	40
72:16:10	30	0.5	15

Atendiendo a estos valores comprobamos que no producen la potencia necesaria para nuestra aplicación. Por ejemplo utilizando el transformador con la relación de espiras 6:1:1 podríamos alimentar una luminaria compuesta por 14 ramas de 5 LEDs cada una, haciendo una suma total de 70 LEDs, la cual, aun siendo una buena aproximación, todavía se quedaría lejos de nuestro objetivo.

#### 4.2 Dos etapas: PFC y fuente de corriente

Como se ha concluido previamente, no hay en el mercado estudiado una etapa que cubra todas nuestras necesidades de forma específica, por lo que el siguiente paso es utilizar la combinación de dos elementos para conseguir nuestro objetivo. (Fig. 18)

El primero de estos elementos es el corrector de factor de potencia, el cual permitirá tener a la salida del mismo un bus de DC al cual conectar una fuente de corriente, de manera que las características combinadas del uso conjunto de las dos dando como resultado un sistema capaz de ofrecer una alta potencia a la salida.

El corrector del factor de potencia se impone para potencias superiores a 75W con el fin de cumplir la norma de armónicos (IEC-61000-3-2). La demanda de potencia para luminarias con LED se sitúa en potencias superiores a 100W, por ello se requiere disponer de etapas de alta eficiencia y densidad de potencia en este rango de necesidades.

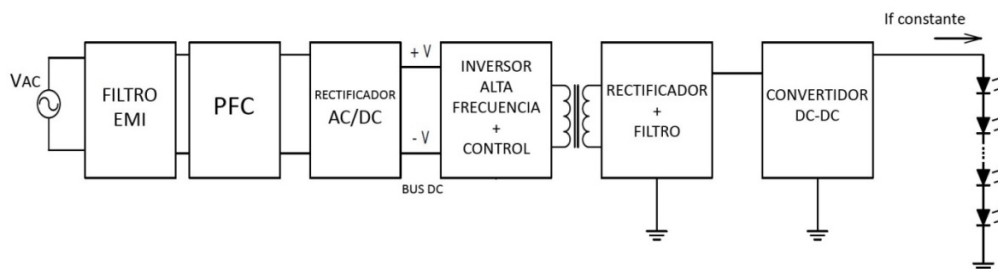


Fig. 18. Esquema del montaje de una etapa PFC + Fuente de corriente



## 5 Etapas de alta densidad de potencia

En el siguiente paso en la búsqueda de una solución para nuestros requerimientos de potencia a la salida vamos a estudiar la etapa configurada como un semipunto resonante LLC, para la cual se dispone de un circuito integrado específico del fabricante Fairchild Semiconductor junto con una nota de aplicación AN-4151 para facilitar el diseño. [11]

La etapa LLC y su dual LCC utilizan la resonancia para hacer conmutaciones con tensión nula o con corriente nula permitiendo aumentar la eficiencia al reducir las pérdidas de conmutación. La Fig. 19 muestra la disposición de los componentes

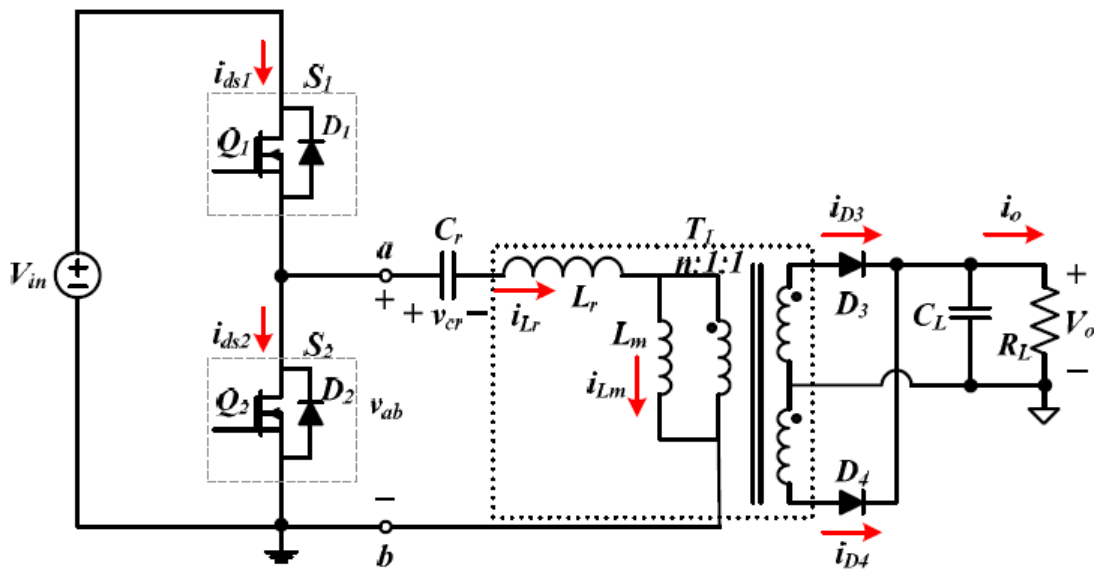


Fig. 19. Diagrama del circuito de una etapa LLC resonante [12]

Los dos transistores de potencia están integrados en la capsula del circuito y tienen capacidad para controlar las corrientes demandadas por la aplicación.

La resonancia serie-paralelo quiere decir que uno de los elementos de la resonancia (bobina o condensador) se duplica y se disponen, uno en serie con la carga y otro en paralelo con la carga. En la Fig. 19 hay una bobina en paralelo con la carga y otra en serie con la misma. En la Fig. 20 hay un condensador en paralelo con la carga y otro en serie con ella. En ambas figuras, la carga está representada por el primario del transformador.

Cuando se comparan las configuraciones híbridas LLC o LCC con las configuraciones simples LC (serie o paralelo) las configuraciones híbridas ofrecen mejor regulación de tensión y mejor comportamiento en situaciones de circuito abierto y cortocircuito. [13]

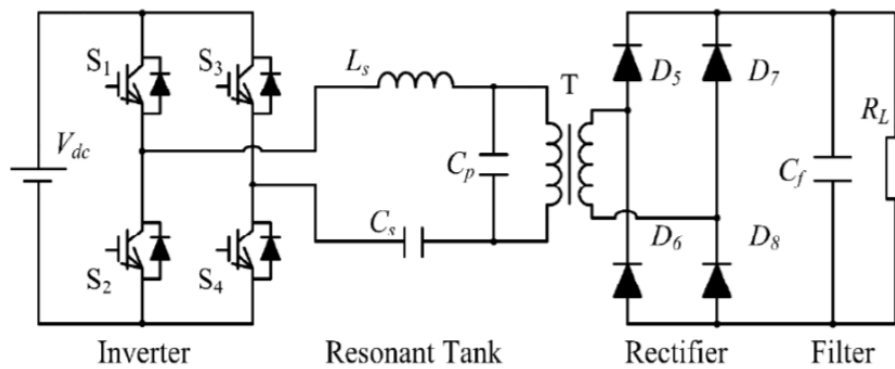


Fig. 20. Convertidor resonante LCC tipo serie paralelo [14]

## 5.1 Etapa LLC como fuente de tensión

En una primera aproximación nos centraremos en el estudio y ensayo de la etapa como fuente de tensión para comprobar que nos es útil para nuestra implementación.

### 5.1.1 Esquema

El esquema propuesto por la nota de aplicación (Fig. 21) nos indica el esquemático de todos sus componentes y su conexión entre ellos, así como los valores de cada uno.

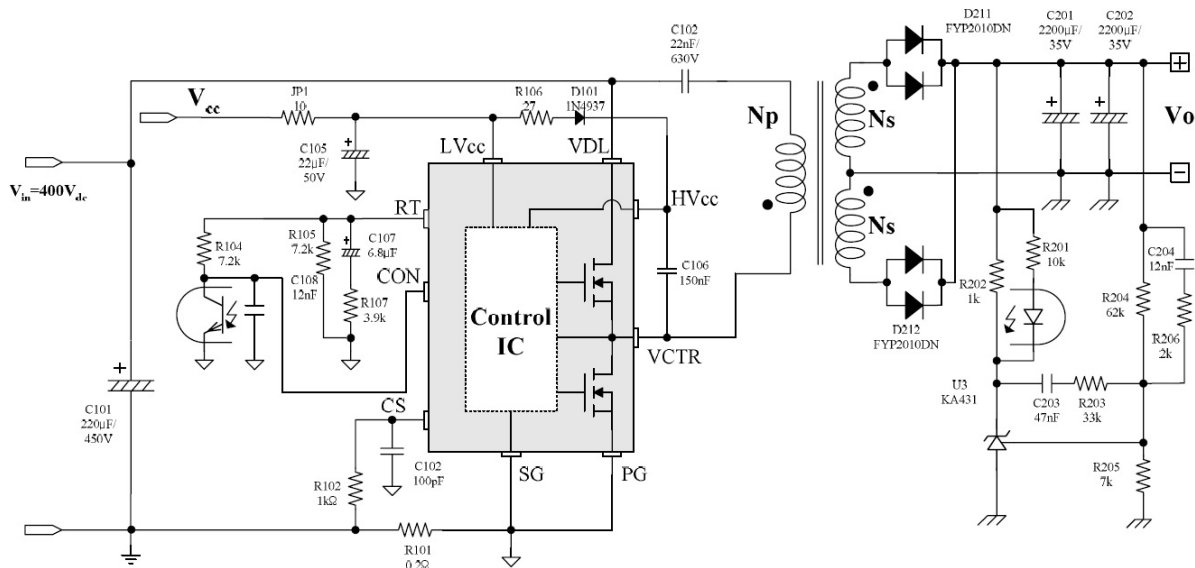


Fig. 21. Esquema de circuito del convertidor en semipunto resonante LCC configurado como fuente de tensión constante [11]

En el esquema del circuito se puede apreciar dos partes separadas entre sí por el trafo que transforma la tensión de 400Vdc de entrada en 24V, 8A y 192W de salida. Asimismo el transformador proporciona aislamiento galvánico. La estabilización de la tensión se realiza con un TL431 que, mediante un optoacoplador controla la corriente que gobierna el oscilador. También se puede distinguir un bloque llamado control IC, el cual no es otra cosa que el

interruptor de potencia de Fairchild, el cual va conectado a su correspondiente alimentación Vcc.

Este planteamiento es el que se ha utilizado como guía para realizar el esquema del circuito en el programa de diseño de PCB Altium Designer. La Fig. 22 muestra el esquemático utilizado para la creación de la placa prototipo es el siguiente, también incluido con mayor resolución en el Anexo V.

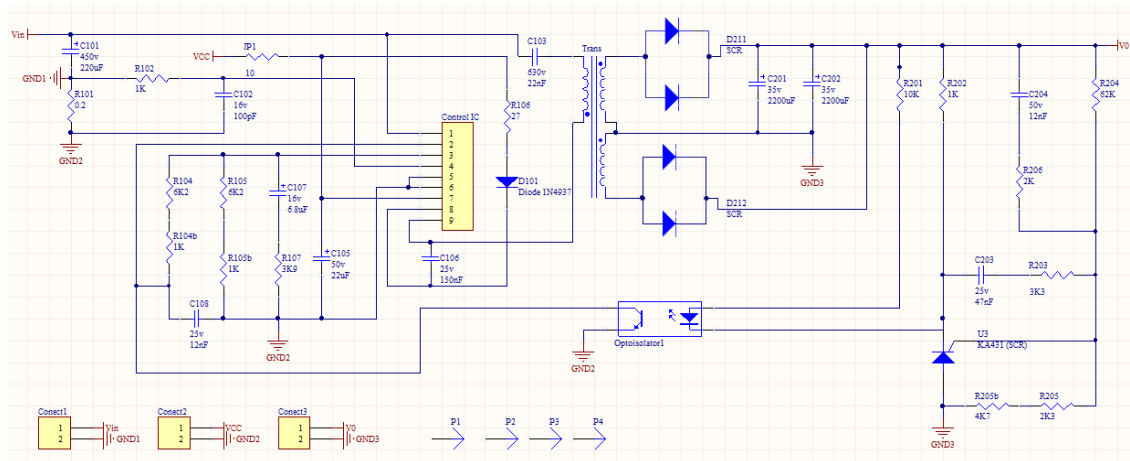


Fig. 22. Esquema del circuito de la placa prototipo

### 5.1.2 Ganancia de tensión

En la selección del modelo del transformador se ha tenido en cuenta que las magnitudes sean medibles mediante ensayo y que quedan claramente identificados los elementos que participan en la resonancia.

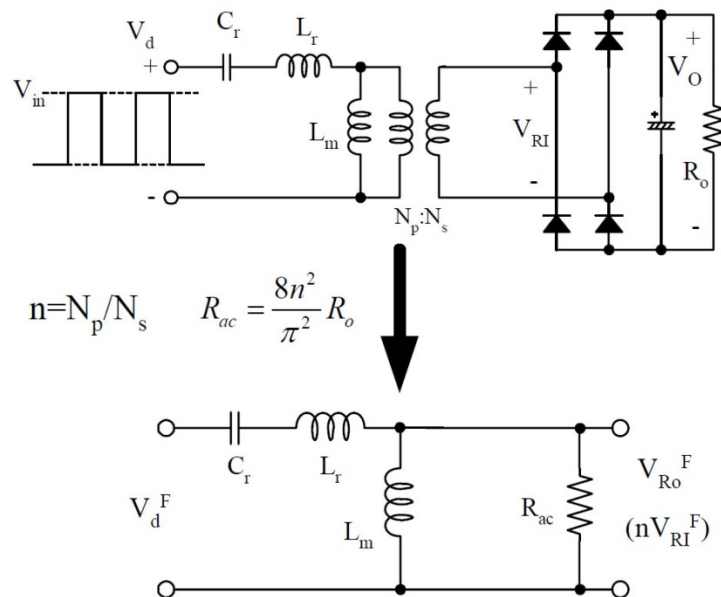


Fig. 23. Equivalente simplificado del convertidor resonante LLC para el armónico fundamental [11]

Utilizando el equivalente de la Fig. 23 tenemos la ecuación de ganancia de tensión del armónico fundamental (superíndice F):

$$M = \frac{V_{RO}^F}{V_d^F} = \frac{n \cdot V_{RI}^F}{V_d^F} = \frac{\frac{4n \cdot V_o}{\pi}}{\frac{4V_{in}}{\pi 2}} = \frac{2n \cdot V_o}{V_{in}}$$

Donde numerador y denominador representan las amplitudes del armónico fundamental contenido en las ondas cuadradas  $V_{in}$  y  $V_{RI}$  respectivamente. Esta expresión viene dada por

$$M = \frac{jL_m\omega \parallel R_{ac}}{jL_m\omega \parallel R_{ac} + \left(jL_r\omega + \frac{1}{j\omega C_r}\right)} = \frac{jL_m\omega \cdot R_{ac}}{jL_m\omega \cdot R_{ac} + (R_{ac} + jL_m\omega) \left(jL_r\omega + \frac{1}{j\omega C_r}\right)}$$

Multiplicando numerador y denominador por  $j\omega C_r$  obtenemos:

$$M = \frac{-L_m C_r \omega^2 \cdot R_{ac}}{-L_m C_r \omega^2 \cdot R_{ac} + R_{ac} \cdot (-L_r C_r \omega^2 + 1) + jL_m\omega \cdot (-L_r C_r \omega^2 + 1)}$$

Donde sí realizamos las siguientes sustituciones:

$$M = \frac{L_p}{L_r} = \frac{L_m + L_r}{L_r} = \frac{L_m}{L_r} + 1 \quad L_m = L_r(m - 1)$$

$$Q = \frac{Z_o}{R_{ac}} = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \cdot \frac{1}{R_{ac}} \quad \omega_o = \frac{1}{\sqrt{C_r \cdot L_r}} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{C_r \cdot L_p}} \quad \omega_o^2 = \omega^2 \cdot \frac{L_p}{L_r}$$

Y multiplicamos numerador y denominador por  $\frac{1}{-R_{ac}}$  obtenemos:

$$\begin{aligned} M &= \frac{L_r C_r \omega^2 \cdot (m - 1)}{\frac{\omega^2}{\omega_p^2} \cdot (m - 1) + \frac{\omega^2}{\omega_o^2} - 1 + j \frac{L_r \cdot (m - 1) \cdot \omega}{R_{ac}} \cdot \left(\frac{\omega^2}{\omega_o^2} - 1\right)} \\ &= \frac{\frac{\omega^2}{\omega_o^2} \cdot (m - 1)}{\frac{\omega^2}{\omega_p^2} \cdot (m - 1) + jL_r \cdot (m - 1) \cdot \omega \cdot Q \cdot \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \cdot \left(\frac{\omega^2}{\omega_o^2} - 1\right)} \\ &= \boxed{\frac{\frac{\omega^2}{\omega_o^2} \cdot (m - 1)}{\frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1 + j \cdot (m - 1) \cdot \frac{\omega}{\omega_o} \cdot Q \cdot \left(\frac{\omega^2}{\omega_o^2} - 1\right)}} \end{aligned}$$

Se observa que en resonancia ( $\omega = \omega_o$ ) la ganancia  $M$  no depende de  $Q$

A la hora de realizar el diseño habrá que tener en cuenta también las fugas de flujo en el secundario, modeladas como la impedancia  $L_{lks}$ . De esta manera el esquema del convertidor LLC quedaría de la siguiente manera (Fig. 28).

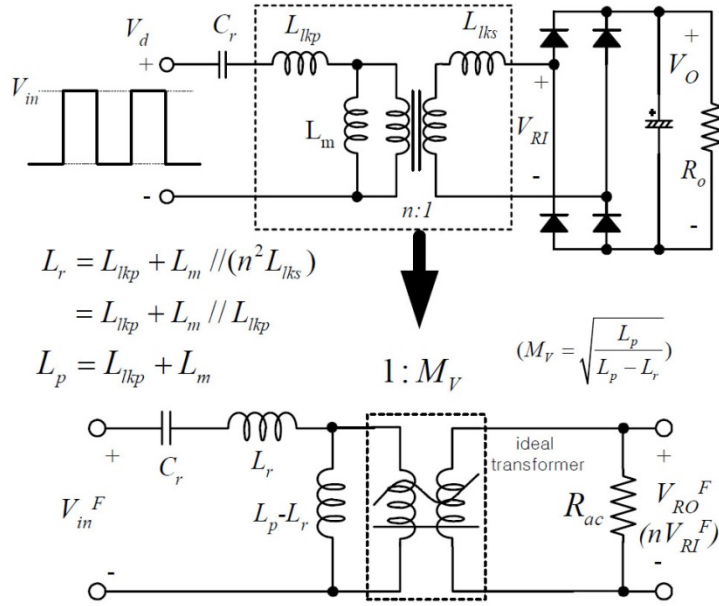


Fig. 24. Equivalente simplificado del convertidor resonante LLC teniendo en cuenta la dispersión de flujo [11]

Siendo la ecuación de la ganancia del armónico fundamental resultante la siguiente:

$$M = \frac{2n \cdot V_o}{V_{in}}$$

$$M = \frac{R_{ac} \cdot I_s}{R_{ac} \cdot I_s + j\omega L_{kp} I_s + j\omega L_{kp} (I_s + I_m) + \frac{1}{jC_r \omega} (I_s + I_m)}$$

Conociendo la relación:

$$\frac{I_s}{I_m} = \frac{\frac{1}{R_{ac} + j\omega L_k}}{\frac{1}{j\omega L_m}} = \frac{j\omega L_m}{R_{ac} + j\omega L_k}$$

Sustituimos en la ecuación  $I_s$ , dividimos por  $R_{ac} \cdot I_m$  y multiplicamos numerador y denominador por  $R_{ac} + j\omega L_k$  obteniendo:

$$M = \frac{j\omega L_m}{j\omega L_m + 2 \cdot \frac{j\omega L_k}{R_{ac}} \cdot j\omega L_m + j\omega L_k + \frac{R_{ac} + j\omega(L_k + L_m)}{jC_r \omega R_{ac}} - \frac{\omega^2 L_k^2}{R_{ac}}}$$

Multiplicando por:  $\frac{\omega^2 C_r}{j}$

$$M = \frac{\omega^2 C_r \cdot \frac{L_p}{M_v}}{\omega^2 C_r L_p - 1 + j \cdot \left( \frac{\omega^2}{R_{ac}} \cdot 2\omega C_r L_p^2 \frac{M_v - 1}{M_v^2} - \omega \frac{L_p}{R_{ac}} \right) + \frac{\omega^2 C_r}{R_{ac}} \cdot \omega L_p^2 \cdot \left( \frac{M_v - 1}{M_v^2} \right)^2}$$

$$= \frac{\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{m}{M_v}}{\frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1 + j \cdot \left( \frac{\omega^2}{R_{ac}} \cdot \omega C_r L_r^2 m^2 \cdot \left( 2 \cdot \frac{(M_v - 1)}{M_v^2} + \frac{(M_v - 1)^2}{M_v^2} \right) - \frac{\omega m L_r}{R_{ac}} \right)}$$

Resolviendo el paréntesis del denominador:

$$\begin{aligned} M &= \frac{\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{m}{M_v}}{\frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1 + j \cdot \left( \frac{\omega^2}{R_{ac}} \cdot \omega C_r L_r^2 m^2 \cdot \left( \frac{1}{m} \right) - \frac{\omega m L_r}{R_{ac}} \right)} \\ &= \frac{\frac{\omega}{\omega_0} (m - 1) M_v}{\frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1 + j \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_0^2} \cdot m \frac{L_r \omega^2}{R_{ac}} - \frac{\omega}{\omega_0^2} C_r R_{ac} \right)} \end{aligned}$$

Sabiendo que:

$$\frac{1}{\omega_0 C_r} = L_r \omega_0$$

Tenemos:

$$M = \frac{\frac{\omega}{\omega_0} (m - 1) M_v}{\frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1 + j \cdot \left( \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \omega \frac{\omega_0}{\omega_0} \cdot \frac{L_r m}{R_{ac}} \cdot \frac{m - 1}{m - 1} - \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{\omega_0 L_r m}{R_{ac}} \cdot \frac{m - 1}{m - 1} \right)}$$

Sustituyendo el nuevo factor de calidad:

$$Q_e = \frac{\omega_o \cdot L_r}{\frac{R_a}{M_v^2}} = \frac{\omega_0 L_r m}{R_{ac} (m - 1)}$$

$$M = \frac{\frac{\omega}{\omega_0} (m - 1) M_v}{\frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1 + j \cdot \left( \frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 \right) \cdot \frac{\omega}{\omega_0} \cdot (m - 1) \cdot Q_e}$$

Esta expresión responde al esquema simplificado de la Fig. 25.

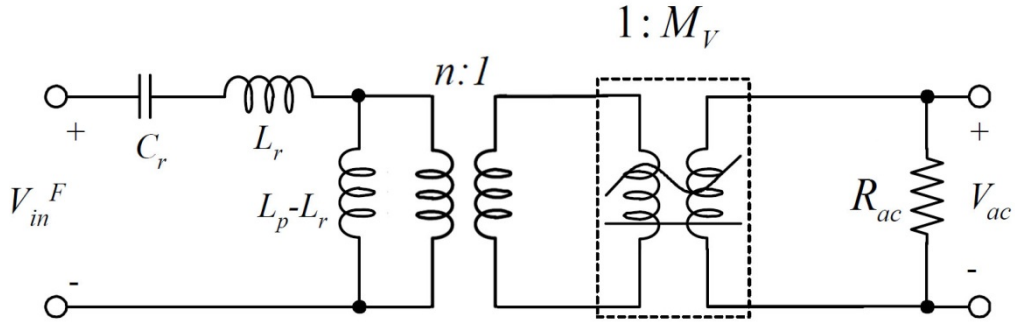


Fig. 25. Equivalente simplificado del convertidor resonante LLC teniendo en cuenta la dispersión de flujo magnético en el secundario

### 5.1.3 Graficas de ganancia en Mathcad. Calculo de los elementos.

Se utiliza Mathcad para representar  $M(\omega, \omega_o, m, \omega_p, Q)$  la Fig. 26 muestra la gráfica con trafo ideal. Se observa que en resonancia la ganancia es  $M = 1$  y todas las curvas pasan por el mismo punto.

$$M(\omega, \omega_o, m, \omega_p, Q) = \frac{\frac{\omega^2}{\omega_o^2} \cdot (m - 1)}{\frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1 + j \cdot (m - 1) \cdot \frac{\omega}{\omega_o} \cdot Q \cdot \left( \frac{\omega^2}{\omega_o^2} - 1 \right)}$$

De nuevo se observa que en resonancia ( $\omega = \omega_o$ ) la ganancia es  $M = 1$  y no depende de  $Q$ .

Las gráficas muestran que se puede utilizar la frecuencia como variable de control para estabilizar la tensión de salida aunque varíe la tensión de entrada. En el caso de que la tensión de entrada se reduzca se requiere aumentar la ganancia, es decir, habría que bajar la frecuencia.

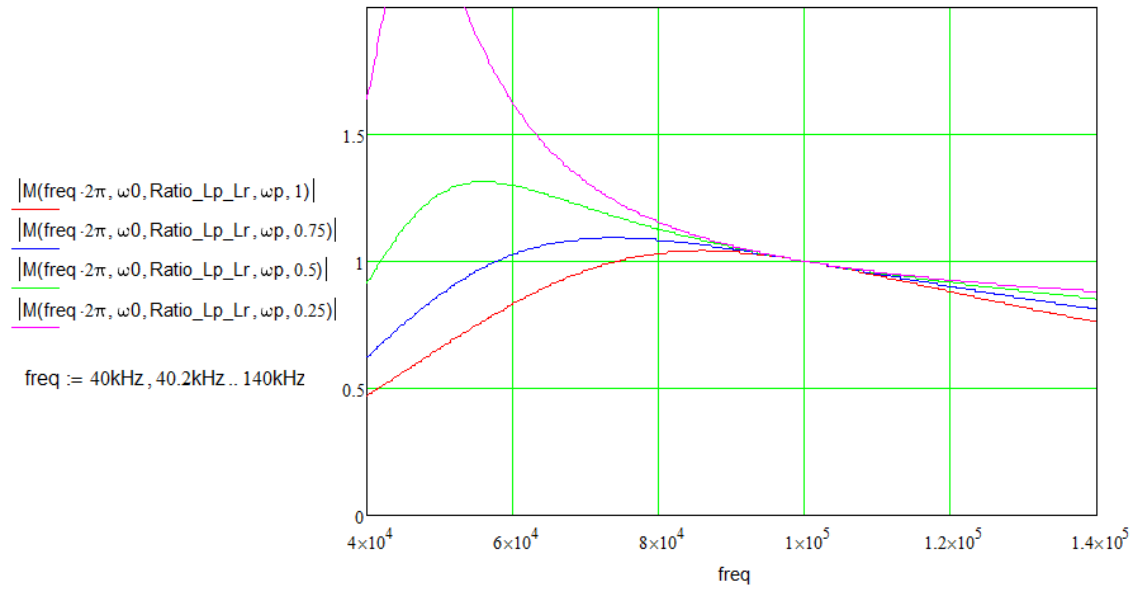


Fig. 26. Grafica de la ganancia con trafo ideal para diferentes valores de Q. En resonancia todas las curvas pasan por el mismo punto.

Siguiendo el mismo planteamiento a partir de la expresión de la ganancia para el trafo real podemos representar gráficamente (Fig. 27) el resultado para diferentes valores de Q y frecuencia.

$$M = \frac{\frac{\omega^2}{\omega_0^2} (m-1) \cdot M_v}{\frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1 + j \cdot \left( \frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1 \right) \cdot \frac{\omega}{\omega_0} \cdot (m-1) \cdot Q \cdot M_v^2}$$

En resonancia la ganancia es

$$M_v = \sqrt{\frac{m}{m-1}} \quad \text{Con: } m = \frac{L_p}{L_r}$$



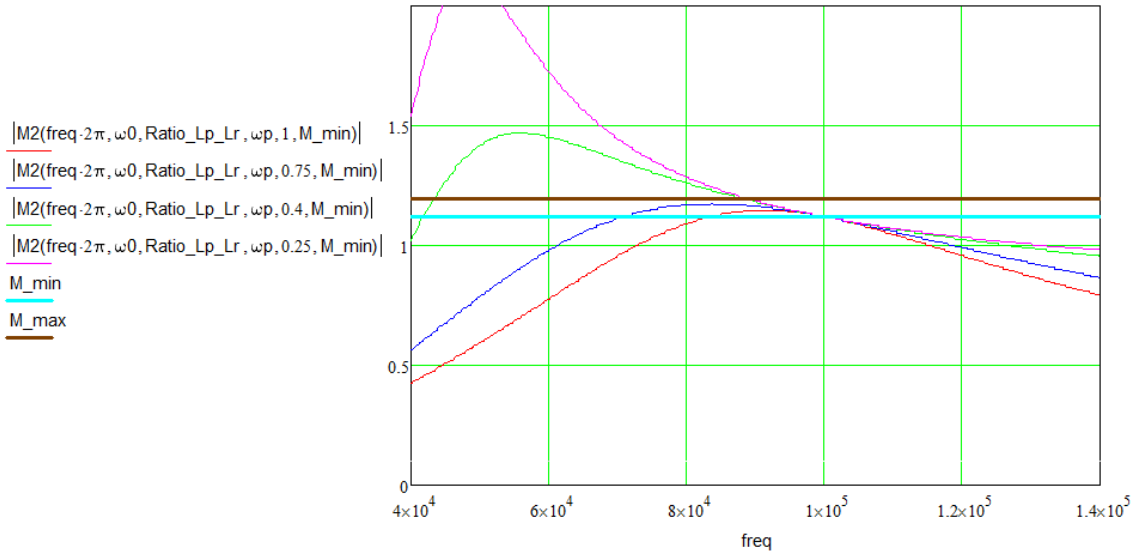


Fig. 27. Grafica de la ganancia con trafo real.

En esta grafica se han añadido las rectas horizontales  $M_{min}$  y  $M_{max}$  para mostrar el rango en que debe variar la frecuencia para atender los casos en que la tensión del bus es máxima y mínima respectivamente.

El cálculo de todos los elementos y valores resultantes del diseño se justifican en el Anexo I. Los datos de la tabla VI son un resumen de los mismos.

Tabla VI. Resumen del cálculo de elementos

Nombre	Sigla	Valor
Potencia de salida	$P_o$	101,319W
Rendimiento	$\mu$	0,92
Frecuencia resonancia	$f_s$	100 KHz
Ganancia a V max	$M_{min}$	1,118
Factor de calidad	$Q_r$	0,4
Tensión Bus	$V_{bus}$	400 V
Ganancia en resonancia	$m$	5
Omega resonancia	$\omega_0$	$2 \cdot \pi \cdot 100\text{KHz}$
Omega polo	$\omega_p$	$2 \cdot \pi \cdot 44,721\text{KHz}$
Condensador resonante	$C_r$	10nF
Inductancia resonante	$L_r$	238 $\mu\text{H}$
Inductancia resonante p	$L_p$	1,19E3 $\mu\text{H}$
Resistencia Soft Start	$R_{SS}$	4,7 K $\Omega$
Condensador Soft Start	$C_{SS}$	1,509 $\mu\text{F}$
Frecuencia Soft Start	$f_{iss}$	237,1 KHz



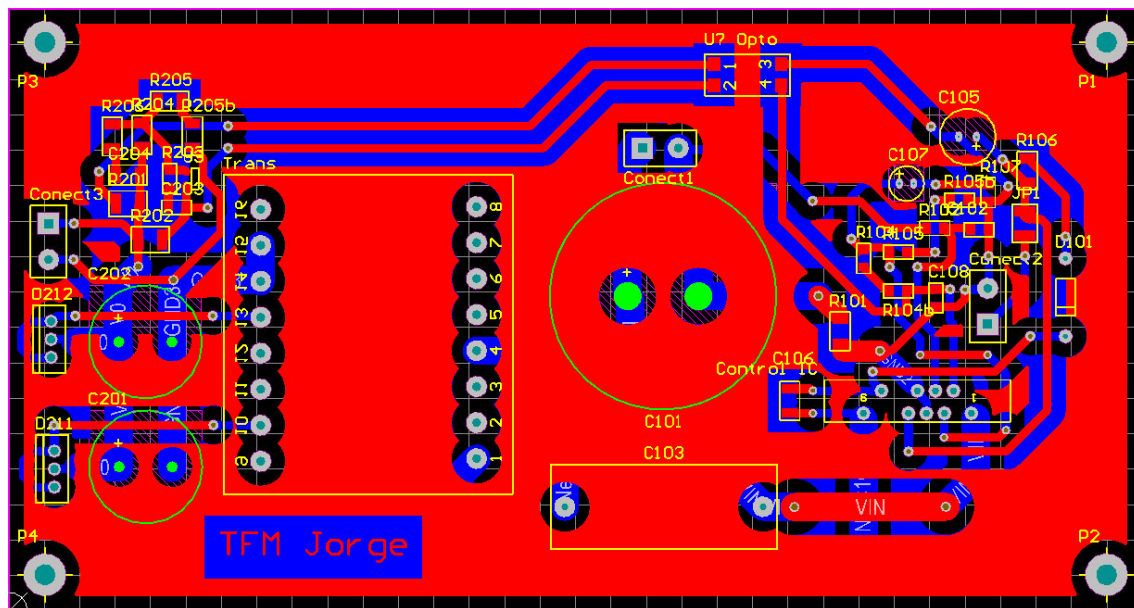


Fig. 29. PCB Cara superior

Otra pauta que se siguió fue el intentar que las líneas entre los componentes SMD fueran lo más cortas posibles. Para la realización de toda la placa se aprovecharon las posibilidades que ofrecía usando las dos capas quedando el aspecto de la capa inferior de la manera mostrada en la Fig. 30.

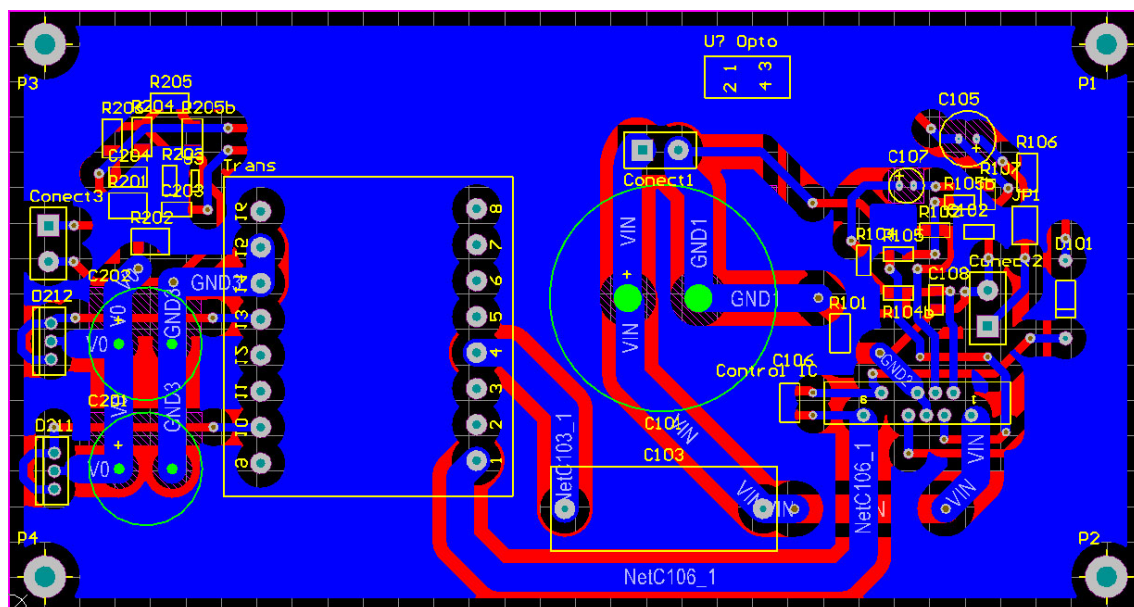


Fig. 30. PCB Cara inferior

La Fig.31 muestra el aspecto de la fuente construida con el “layout” de los componentes.

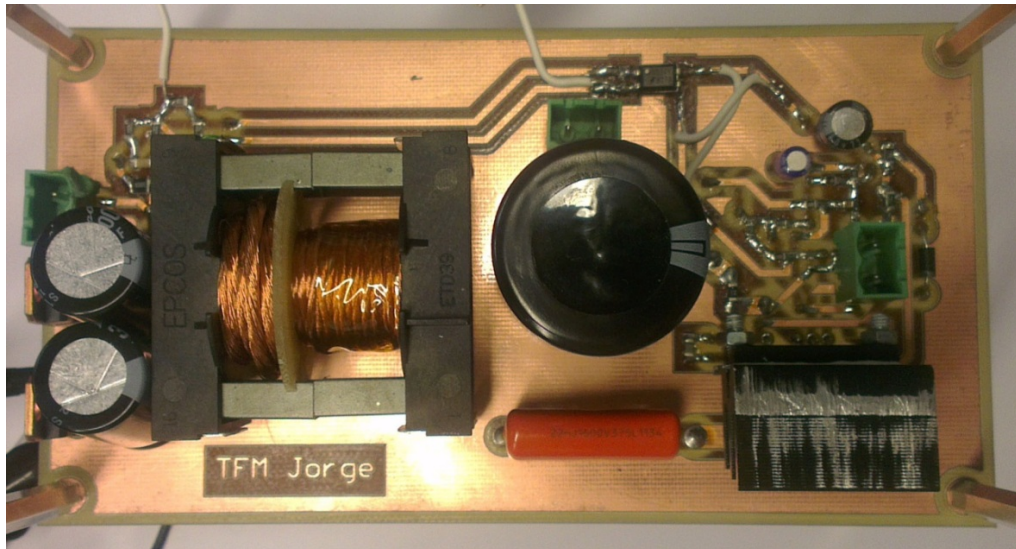


Fig. 31. Vista superior placa prototipo

### 5.1.6 Ensayos del circuito

Los ensayos realizados con la placa prototipo son los siguientes.

-Frecuencia mínima antes de regulación (Fig. 32):

La salida de la fuente está conectada a una carga de resistencias de potencia de valor  $10\ \Omega$ . Se aumenta la tensión  $V_{bus}$  hasta el máximo valor que mantiene la frecuencia en su mínimo. En el punto en el que la frecuencia comienza a aumentar se toman datos acerca del estado del sistema, los datos recogidos son:

$$V_{bus} = 257.5\ V \quad f = 70,3\ KHz$$

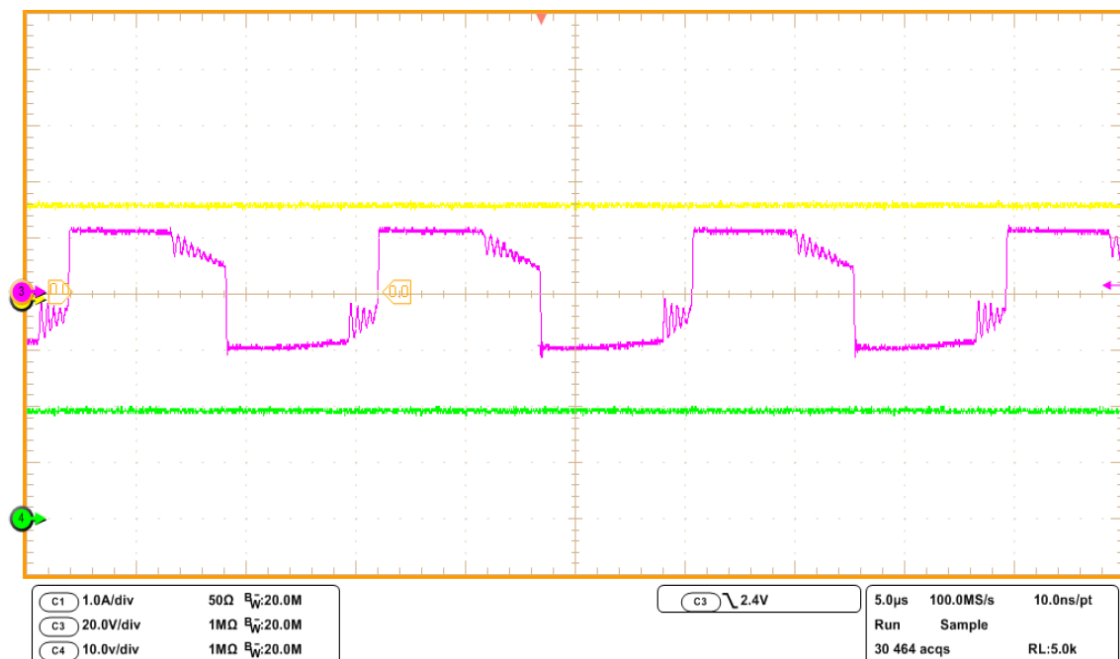


Fig. 32. Ensayo tensión máxima antes de regulación. Amarillo, corriente en la carga. Verde, tensión del secundario del transformador de salida.

-Frecuencia de trabajo a  $V_{bus} = 400\text{ V}$

La salida de la fuente está conectada a una carga de resistencias de potencia de valor  $10\ \Omega$ . Se aumenta la tensión  $V_{bus}$  hasta que alcanza la tensión de  $400\text{ V}$  y se recogen los valores obtenidos (Fig. 33).

$$V_{bus} = 400\text{ V} \quad f = 106,4\text{ KHz} \quad V_o = 24,8\text{ V (Constante)} \quad I_o = 2,16\text{ A}$$

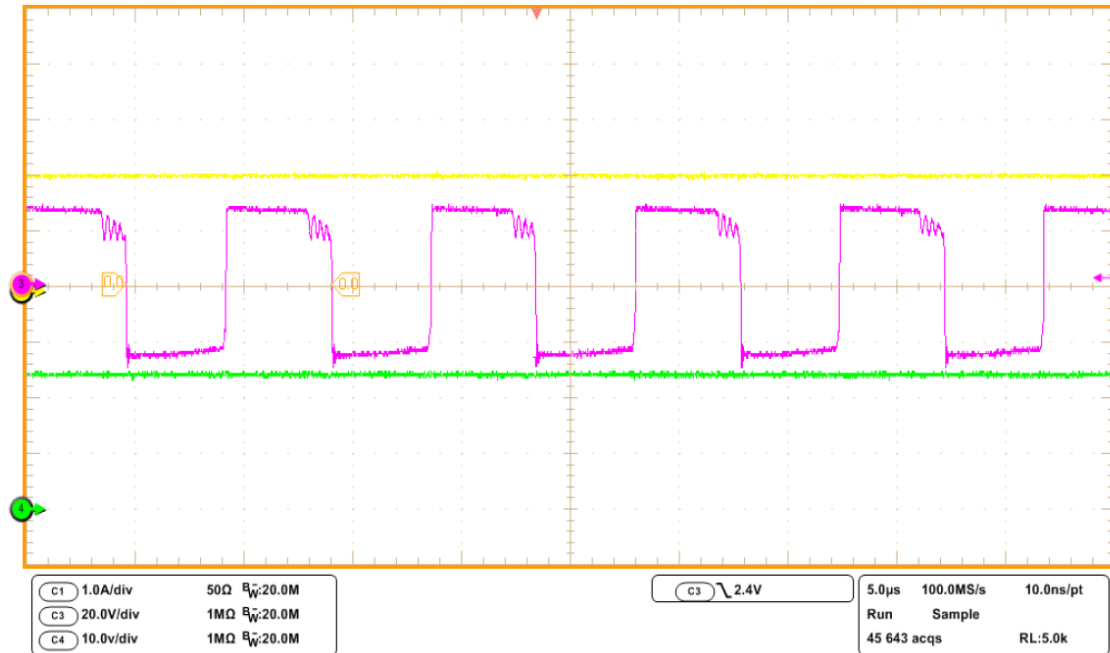


Fig. 33. Ensayo a tensión de bus de  $400\text{V}$ . Amarillo, corriente en la carga. Verde, tensión del secundario del transformador de salida

## 5.2 Etapa LLC como fuente de corriente

A partir de la estructura de la etapa LLC como fuente de tensión se implementa un circuito que permite que la fuente pase a funcionar como fuente de corriente.

Para convertir la fuente en modo tensión a modo corriente se añade un regulador shunt para limitar al corriente en paralelo con el shunt regulador de la tensión. Con ambos reguladores se realiza la función “OR” uniendo sus ánodos de tal manera que la regulación de la frecuencia la realiza aquel regulador que primeramente resulte activado por el parámetro sentido (corriente de carga o tensión de salida).

Se ajustan los reguladores para que entre primero la limitación de corriente y, en caso de circuito abierto entre la regulación de la tensión. La tensión a regular se establece en  $1\text{V}$  superior a la tensión máxima de salida requerida por la luminaria.

### 5.2.1 Esquema

El circuito que permite el funcionamiento de la etapa como fuente de corriente consiste en un regulador shunt TL411 acoplado a una resistencia de sentido de valor  $1,11\ \Omega$  sobre la que pasa la corriente de la carga que conectamos a la etapa (Fig. 34).

Primeramente se utiliza una resistencia de  $10\Omega$  para verificar la limitación en intensidad y posteriormente se sustituye la resistencia por la luminaria de LEDs.

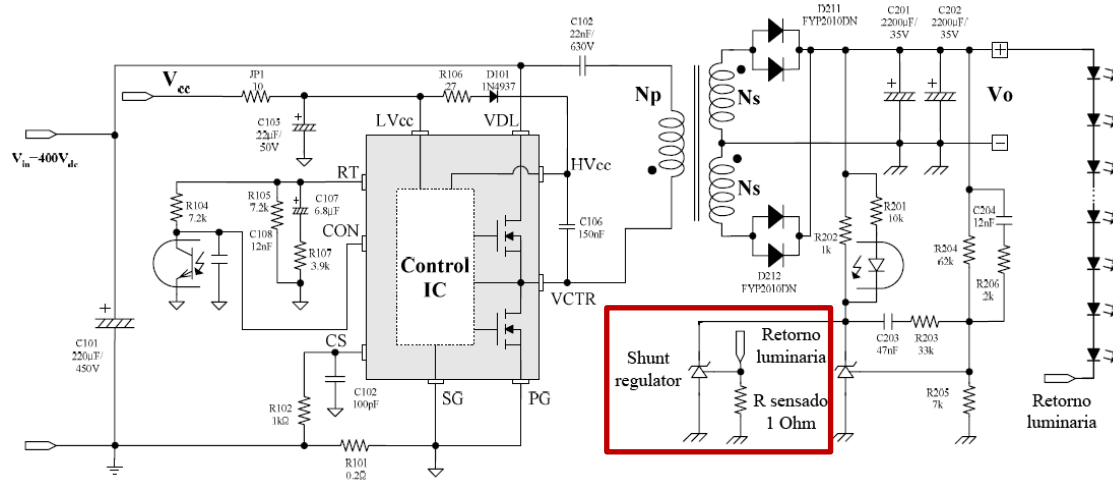


Fig. 34. Esquema circuito etapa LLC funcionando como fuente de corriente. En el recuadro se muestra el regulador shunt que limita la corriente.

## 5.2.2 Modelo de simulación

El modelo de simulación realizado en PSIM se muestra en la Fig. 35.

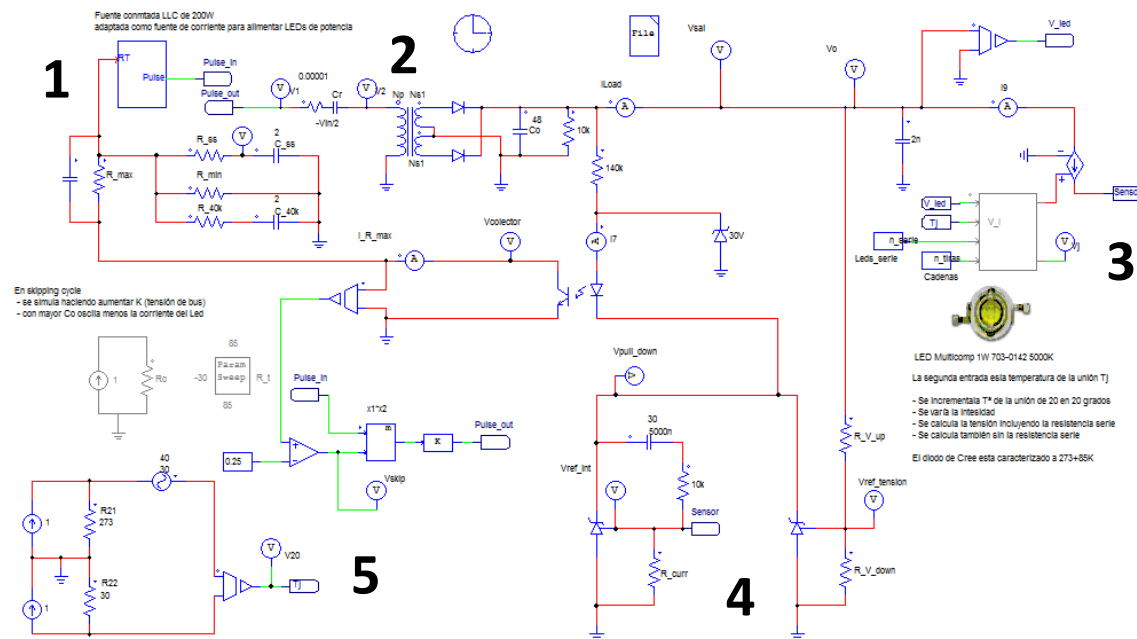


Fig. 35. Esquema PSIM fuente LLC como fuente de corriente con carga de LEDs (7 ramas x 14 LEDs por rama)

Incluye el oscilador (1), la etapa de potencia (2), la carga de LEDs (3), reguladores shunt (4) y temperatura de la unión (5).

### 5.2.3 Ensayos del circuito

-Ensayo a  $V_{bus} = 400V$

La salida de la fuente está conectada a una carga de resistencias de potencia de valor  $10\ \Omega$ . Se aumenta la tensión  $V_{bus}$  hasta que alcanza la tensión de  $400\ V$  y se recogen los valores obtenidos (Fig. 36).

$$\begin{aligned} V_{bus} &= 400\ V & f &= 106,4\ KHz & I_o &= 2,25\ A \\ V_o &= 23,88\ V & V_{Resistencias} &= 21,45\ V & V_{R\ sensado} &= 2,24\ V \end{aligned}$$

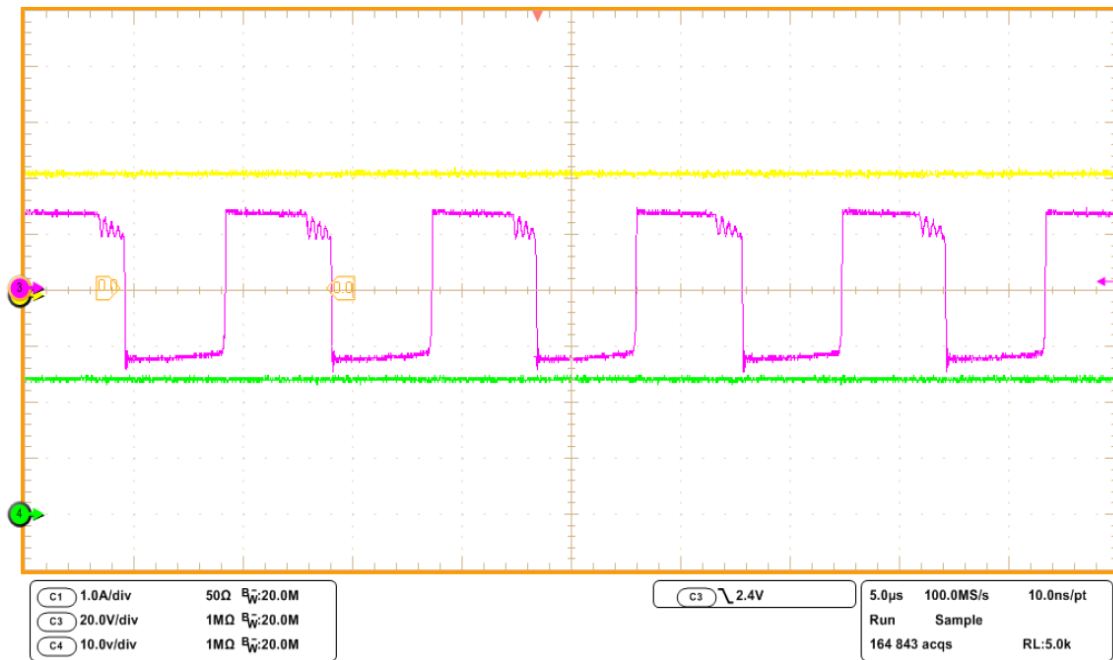


Fig. 36. Ensayo de la limitación de corriente con carga resistiva de  $10\ \Omega$

-Ensayos de pérdida de ciclo (“skipping”)

Para limitar la corriente se reduce la ganancia de la etapa aumentando la frecuencia de oscilación. Si se agota el rango de regulación ( $f = f_{max}$ ) y no se consigue el objetivo, la etapa suspende la oscilación hasta que la perturbación desaparece. Es decir, se pierden ciclos (“skipping”) y la tensión de salida baja.

Para forzar la perdida de ciclo se han realizado dos ensayos En el primero la tensión de bus es de  $370\ V$  con la salida en circuito abierto.

En este ensayo el sistema se encuentra en estado de skipping permanente ya que no hay carga a la salida. Esto provoca que la tensión de salida sea tan alta que el regulador de tensión pide máxima frecuencia. Al conectar las resistencias a la salida abandona el skipping y al momento lo recupera. (Fig. 37)



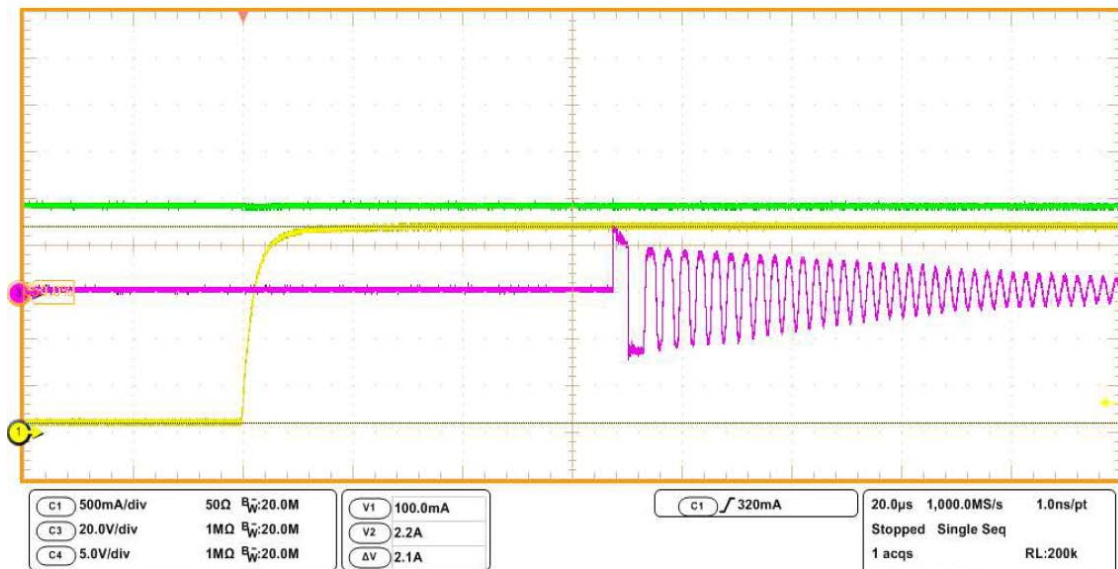


Fig. 37. Ensayo de pérdida de ciclo. Verde, tensión de salida que provoca pérdida de ciclo. Amarillo, corriente en la carga. Morado, tensión en el secundario del transformador cuando se activa un solo ciclo de oscilación.

Si realizamos la observación durante un tiempo mayor obtenemos la gráfica de la Fig. 38:

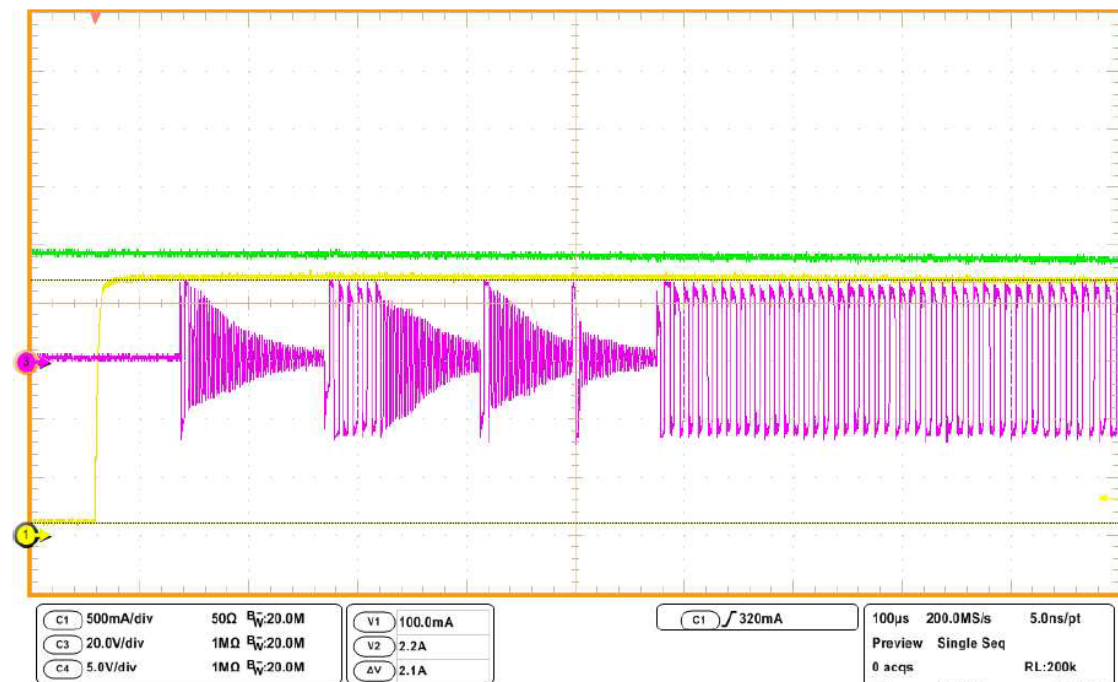


Fig. 38. Ensayo skipping con mayor tiempo observado

Se observa la recuperación de la oscilación después de 4 intentos.

-Ensayos de aumento de carga

La salida de la fuente está conectada a una luminaria que de 49 LEDs distribuidos en 7 ramas con 7 LEDs por rama. Para que funcione en régimen nominal es necesario alimentar la luminaria a 21V y una corriente de 2,45 A.



En el ensayo se aumenta la tensión  $V_{bus}$  hasta que alcanza la tensión de 400 V y la corriente de la luminaria se establece en el valor programado de 2,45 A. En ese momento se conecta en paralelo a la luminaria una carga de resistencias de potencia de valor 20  $\Omega$ . Se pretende observar la reacción del sistema y el pico de corriente resultante de este aumento de carga. Al conectar la resistencia le hubiera correspondido incrementarse la corriente en

$$\frac{V_o}{20\Omega} = \frac{23,88V}{20\Omega} = 1,19A$$

No obstante, el incremento observado es de

$$2,8A - 2,45A = 0,35A$$

Esto se debe a que los LEDs han reducido su consumo debido a su sensibilidad antes los cambios de tensión.

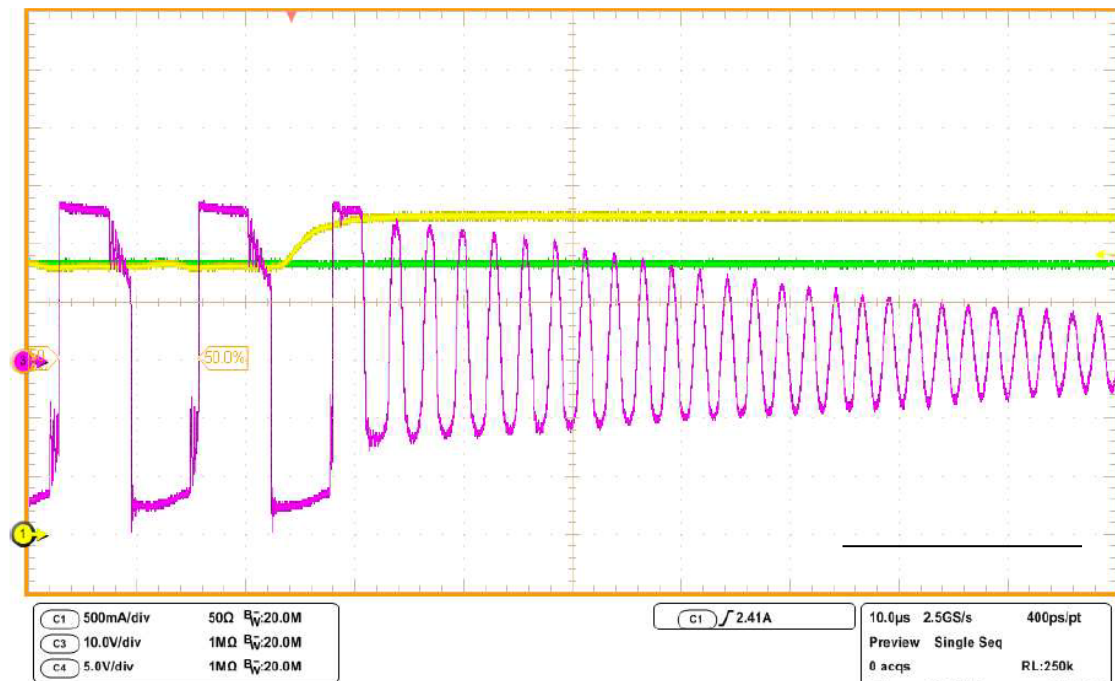


Fig. 39. Ensayo luminaria con conexión de una carga resistiva adicional de 20 $\Omega$

En la Fig. 39 se observa que al conectar la resistencia de potencia de valor 20 $\Omega$  en paralelo a la luminaria se produce un pico de corriente que activa la protección de corriente que incluye la fuente entrando en modo “skipping” en un solo ciclo de oscilación.

Se observa que el ancho del pulso alcanza primero su valor mínimo (máxima frecuencia) y posteriormente desaparece la oscilación.

Si aumentamos el tiempo observado obtenemos la Fig. 40 donde se observa el pico completo y su atenuación. La corriente decae durante 1,85ms hasta su valor nominal.

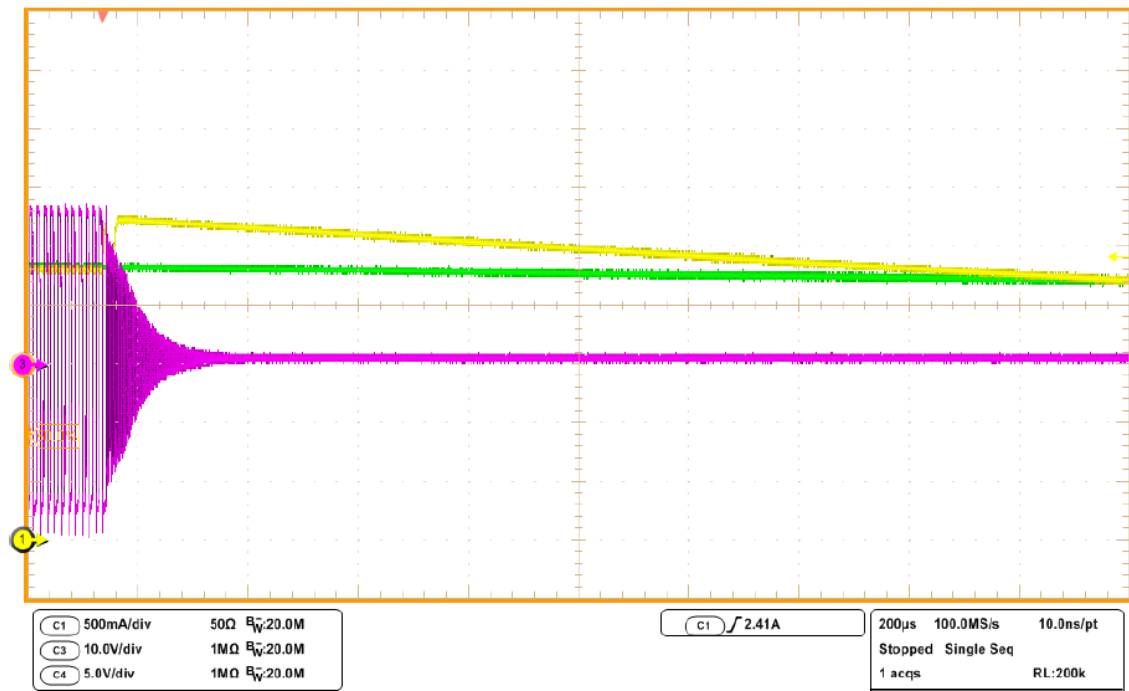


Fig. 40. Ensayo luminaria con conexión carga resistiva  $20\Omega$  con mayor tiempo observado. La corriente decae al descargarse el condensador de salida y se recupera en 1,85ms.

## 6 Conclusiones

- 1.- Se han estudiado las propiedades de un LED de alumbrado que son relevantes como carga de una fuente de alimentación.
- 2.- Se ha obtenido un modelo analítico derivado de la información facilitada en las hojas de datos del fabricante.
- 3.- Se ha establecido el procedimiento de obtención de estos parámetros.
- 4.- Se ha implementado un modelo de simulación de LEDs dependiente de la temperatura que permite el modelado de una luminaria completa.
- 5.- Se ha realizado un modelo de simulación de la fuente resonante LLC que incorpora a una luminaria como carga y que permite implementar el control en modo tensión y en modo corriente.
- 6.- El método de sensado utilizado introduce una pérdida de eficiencia debido a que toda la corriente pasa sobre una resistencia sometida a 2,5 V. Este método es eficiente si se trabaja con pocas ramas y muchos LEDs en serie ya que las pérdidas en el sensor son proporcionales a la intensidad sensada.
- 7.- Para reducir este problema conviene explorar soluciones con reguladores shunt de baja tensión contruidos con el TLV 431 con tensiones de referencia de 1,24V. [15]
- 8.- En cada rama conectada en paralelo hay que colocar pequeñas resistencias en serie para compensar el aumento de la intensidad con la temperatura.
- 9.- Para luminarias en que la fuente esta próxima se pueden explorar protecciones con reguladores shunt por rama para tener una función "OR" que impida que una rama tenga que absorber la corriente de otra que haya quedado inutilizada.
- 10.- Para aumentar la fiabilidad del sistema habría que eliminar del mismo los condensadores electrolíticos.

## Anexos

### Anexo I: Cálculo de los elementos de una fuente de tensión LLC

-Determinación relación de espiras del trafo.

$$V_{bus} = 400V \quad V_0 = 42,16V \quad V_f = 0,9V$$

Donde  $V_f$  representa la caída en conducción del diodo rectificador.

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{\frac{V_{bus}}{2}}{V_0 + V_f} \cdot M_{min} = 4,9 \approx 5$$

-Potencia de salida.

$$P_o = V_0 \cdot I_o = 42,16V \cdot (350mA \cdot 7) = 103,27W$$

-Cálculo de la resistencia equivalente.

$$R_{ac\ Ideal} = \frac{8 \cdot n^2 \cdot V_0^2}{\pi^2 \cdot P_o} = \frac{8 \cdot 5^2 \cdot 42,16V^2}{\pi^2 \cdot 103,27W} = 370,5\Omega$$

$$R_{ac\ Real} = \frac{8 \cdot n^2 \cdot V_0^2}{\pi^2 \cdot P_o \cdot M_{min}^2} = \frac{8 \cdot 5^2 \cdot 42,16V^2}{\pi^2 \cdot 103,27W \cdot 1,118^2} = 296,4\Omega$$

-Diseño de la red resonante

Tomando un valor de  $Q_r$  tal que:

$$Q_r = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \cdot \frac{1}{R_{ac}} = 0,4$$

$$C_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot R_{ac} \cdot Q_r} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100KHz \cdot 370,5\Omega \cdot 0,4} = 10,6\ nF \approx 10\ nF$$

$$L_r = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_s)^2 \cdot C_r} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 100KHz)^2 \cdot 10\ nF} = 238,30\mu H \approx 238\ \mu H$$

$$L_p = L_r \cdot m = 1,19 \cdot 10^3\ \mu H$$

-Diseño del transformador

$$f_{s\ min} = 87,2\ KHz \quad \Delta B = 0,4\ T \quad Ae = 107 \cdot 10^{-6}\ m^2$$

$$N_{p\ min} = \frac{n \cdot (V_o + V_f)}{M_{min} \cdot 2 \cdot f_{s\ min} \cdot \Delta B \cdot Ae} = 27,3 \approx 30$$

$$N_s = \frac{N_{p\ min}}{n} = \frac{30}{5} = 6$$

### -Núcleo del transformador

Viene dado por la nota de aplicación AN4151 siendo concretamente el modelo EER3542 Toung Hwa Ferrite

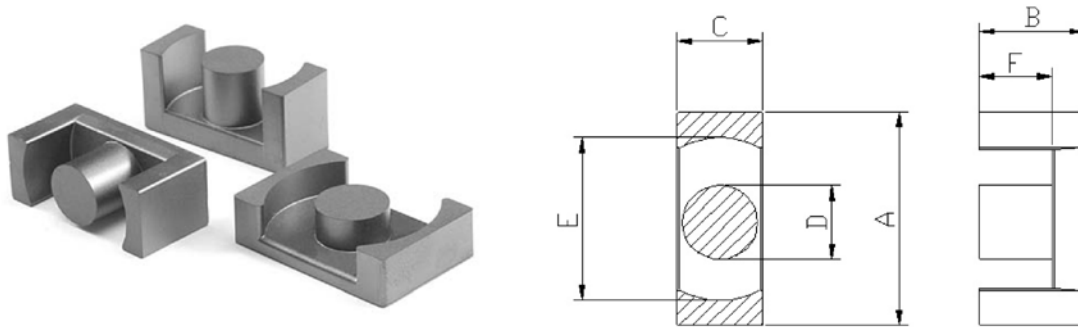


Fig. 41. Núcleos de transformador, alzado y perfil

Tabla VII. Medidas de núcleos de transformador

Modelo	Le(mm)	Ae(mm2)	Ve(mm3)	C1(mm)	Al Value (nH/N2)
EER 3542	91,5	109	9974	0,84	2500

Modelo	A	B	C	D	E	F	G
EER 3542	35,0±0,5	21,3±0,2	11,3±0,3	11,3±0,3	25,3min	14,9min	6,4

### -Construcción del transformador

$$I_{s\ Rms} = \frac{\pi}{4} \cdot I_o = \frac{\pi}{4} \cdot 2,45\ A = 1,92\ A$$

$$I_{p\ Rms} = \frac{I_{s\ Rms}}{n} \cdot \sqrt{2} = 0,54\ A$$

Tomando los valores de corriente por sección soportados por los bobinados elegidos para primario y secundario siguientes:

$$J_{s\ Rms} = 2,5\ \frac{A}{mm^2}$$

$$J_{p\ Rms} = 7,8\ \frac{A}{mm^2}$$

Cálculos para primario

$$A\ Cu_p = \frac{I_{p\ Rms}}{J_{p\ Rms}} = 0,217\ mm^2$$

$$diámetro_p = 0,127\ mm$$

$$A\ Cu_{hilo\ p} = \pi \cdot \frac{(diámetro_p)^2}{4} = 0,0127\ mm^2$$

$$hilos\ N_p = \frac{A\ Cu_p}{A\ Cu_{hilo\ p}} = 17,16$$

Siguiendo las directrices del fabricante Litzwire y las de la nota de aplicación AN4151 elegimos un cable de 30 hilos de 0,127 mm de diámetro.

Cálculos para secundario

$$A Cu_s = \frac{I_{s\ Rms}}{J_{s\ Rms}} = 0,247\ mm^2 \quad diametro_s = 0,1007\ mm$$

$$A Cu_{hilos} = \pi \cdot \frac{(diametro_s)^2}{4} = 7,9643 \cdot 10^{-3}\ mm^2 \quad hilos\ N_s = \frac{A Cu_s}{A Cu_{hilos}} = 30,97$$

De nuevo, siguiendo las directrices del fabricante Litzwire y las de la nota de aplicación AN4151 elegimos un cable de 100 hilos de 0,1007 mm de diámetro.

#### -Selección del condensador resonante

Sabiendo que el rendimiento es de  $\eta = 0,92$

$$I_{cr\ Rms} = \frac{1}{\eta} \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot I_o}{2 \cdot n \cdot \sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot (V_o + V_f)}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot f_s \cdot M_{min} \cdot (L_p - L_r)}\right)^2} = 0,677\ A$$

$$I_{cr\ Pico} = \sqrt{2} \cdot I_{cr\ Rms} = 0,958\ A$$

El nivel de la protección de corriente se establece en OCP=1,5A con un 50% de margen sobre  $I_{cr\ Pico}$

$$I_{ocp} = 1,5A$$

Calculamos las tensiones que ha de soportar el condensador

$$V_{Cr\ Nom} = \frac{V_{bus}}{2} + \frac{\sqrt{2} \cdot I_{cr\ Rms}}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot C_r} = 345,23\ V$$

$$V_{Cr\ Max} = \frac{V_{bus}}{2} + \frac{I_{ocp}}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot C_r} = 427,3\ V$$

#### -Diseño de la red rectificadora

Tensión inversa del diodo

$$V_D = 2 \cdot (V_o + V_f) = 89,3\ V$$

Intensidad eficaz del diodo

$$I_{D\ Rms} = \frac{\pi}{4} \cdot I_o = 1,92\ A$$

Intensidad eficaz del condensador de filtrado

$$I_{Co\ Rms} = \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot I_o}{2 \cdot \sqrt{2}}\right)^2 - I_o^2} = 1,18\ A$$

ESR del condensador

$$R_c = 0,08\ \Omega$$

Dos condensadores en paralelo

$$\Delta V_o = \frac{\pi}{2} \cdot I_o \cdot \frac{R_c}{2} = 0,15 \text{ V}$$

Perdidas conjuntas entre los dos condensadores

$$P_{Co} = I_{Co \text{ Rms}}^2 \cdot \frac{R_c}{2} = 0,056 \text{ W}$$

#### -Configuración del circuito de control

Sabiendo que la corriente por el pin RT del circuito de control determina la frecuencia de oscilación, establecemos que una frecuencia de 100KHz se corresponde con la corriente que circula por una resistencia de valor 5K2  $\Omega$  a una tensión de pin de 2 voltios. Si el optoacoplador tiene una tensión de saturación de 0,2V se obtiene la misma intensidad en 2V/5K2 que en 1,8V/4K68

Tomando una  $f_{s \text{ min}} = 87,2 \text{ KHz}$

$$R_{min} = \frac{f_{5K2}}{f_{s \text{ min}}} \cdot 5,2K\Omega = 5,963K\Omega$$

Cuando este el optoacoplador la frecuencia máxima cumple que

$$f_{max} = \left( \frac{5,2K\Omega}{R_{min}} + \frac{4,68K\Omega}{R_{max}} \right) \cdot f_s$$

$$R_{max} = \frac{4,68K\Omega}{\frac{f_o \cdot 1,4092}{f_s} - \frac{5,2K\Omega}{R_{min}}} = 9 \text{ K}\Omega$$

La frecuencia de arranque Soft Start se establece en 250kHz, 2.5 veces la frecuencia de resonancia

$$f_{ss} = \left[ \left( \frac{5,2K\Omega}{R_{min}} + \frac{5,2K\Omega}{R_{ss}} \right) \cdot f_s \right] + 40KHz$$

Los 40KHz los añade internamente el circuito, y los atenúa durante 3ms.

Se dispone un circuito Rss-Css con una constante de tiempo tal que  $T_{ss} = 3 \cdot R_{ss} \cdot C_{ss}$

La frecuencia de arranque es de dos a tres veces la de resonancia.

$$f_{iss} = 2,4 \cdot f_o = 237,1KHz$$

$$R_{ss} = \frac{5,2K\Omega}{\frac{f_{iss} - 40KHz}{f_s} - \frac{5,2K\Omega}{R_{min}}} = 4,7 \text{ K}\Omega$$

$$T_{ss} = 20 \text{ ms} \quad C_{ss} = \frac{T_{ss}}{2,8 \cdot R_{ss}} = 1,5 \mu F$$

### -Protección y sensado de la corriente

El filtro RC de sensado de la corriente se elige con una constante de tiempo del 1/100 a 1/20 veces el periodo de conmutación

Corriente de protección

$$I_{ocp} = 1,5 A$$

Representación interna del umbral de protección

$$V_{ocp} = 0,6 V$$

$$R_{sensado} = \frac{V_{ocp}}{I_{ocp}} = 0,4 \Omega$$

Constante de tiempo del filtro

$$R_c = \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{f_o} = 1,012 \cdot 10^{-7} s$$

Elegimos arbitrariamente  $R_f = 1K\Omega$

$$C_f = \left( \frac{R_c}{R_f} \cdot \frac{1}{pF} \right) \cdot pF = 101 \cdot pF$$

Para calcular las ganancias en Mathcad primero determinamos el rango en el que se van a encontrar las ganancias en resonancia.

Sabiendo que la relación entre  $L_p$  y  $L_r$  se halla en un valor entre 3 y 7 tomamos:

$$m = 5$$

Calculamos  $M_{min}$  y  $M_{max}$  a la frecuencia de resonancia  $\omega_0$

$$M_{min} = \sqrt{\frac{m}{m-1}} = 1,118$$

$$M_{max} = M_{min} \cdot \frac{V_{bus}}{V_{in min}} = 1,118 \cdot \frac{400V}{372V} = 1,2$$

Hallamos el resto de valores necesarios para realizar la representación gráfica:

$$f_s = 100KHz \quad f_p = \frac{f_s}{\sqrt{m}} = 44,7KHz$$

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_s \quad \omega_p = 2 \cdot \pi \cdot f_p = 2,81 \cdot 10^5 \cdot \frac{rad}{s}$$

Introduciendo los datos anteriores en la expresión que representa la relación entre la tensión AC de entrada al trafo y la tensión AC de salida del semipunto podemos hallar una representación gráfica en función del factor de calidad  $Q$  y la frecuencia.



## Anexo II: Montaje luminaria

La luminaria construida para los ensayos con carga consta de 98 LEDs montados sobre una placa atornillada a un radiador de aluminio para disipar el calor generado.

La Fig. 42 muestra la matriz de LEDs soldados sobre una placa de circuito impreso. La Fig. 43 muestra el radiador de aluminio que sirve de soporte. La Fig. 44 muestra la placa del circuito impreso con las perforaciones para que el fondo del LED apoye sobre el radiador de aluminio. La Fig. 45 y la Fig. 46 muestran el anverso y el reverso de la placa de soporte con los LEDs soldados. La Fig. 47 muestra el montaje final.

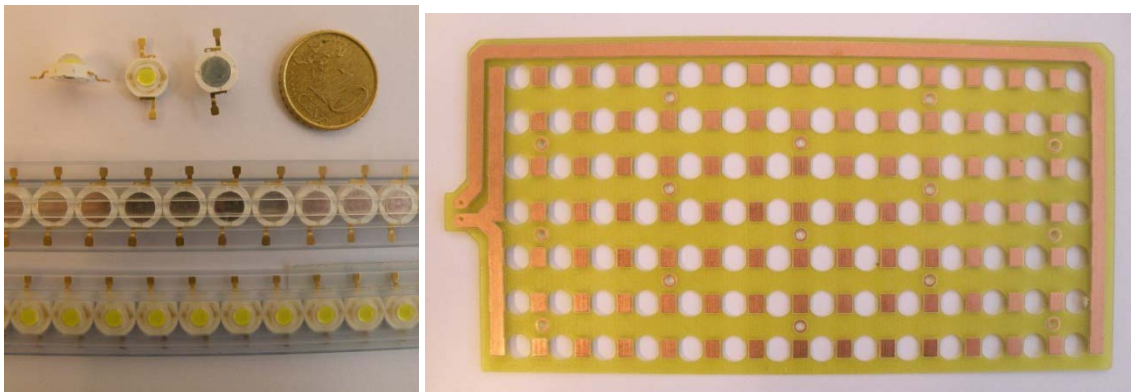


Fig. 42. Detalle LED y placa de montaje

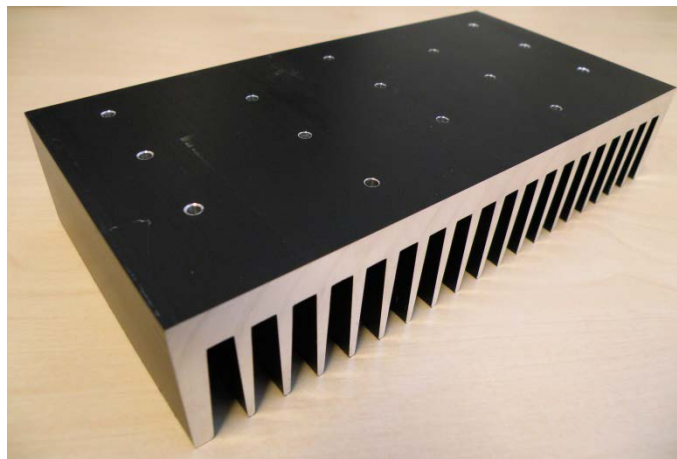


Fig. 43. Radiador de aluminio



Fig. 44. Apariencia de un LED antes del montaje final

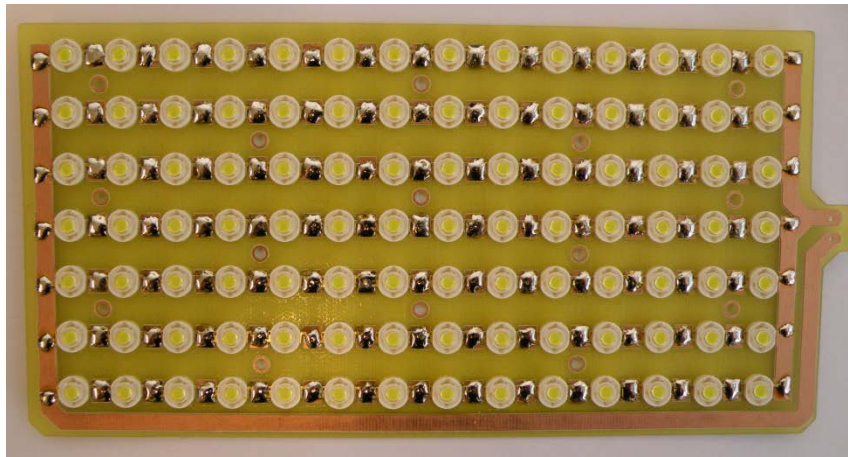


Fig. 45. Placa con los LED soldados

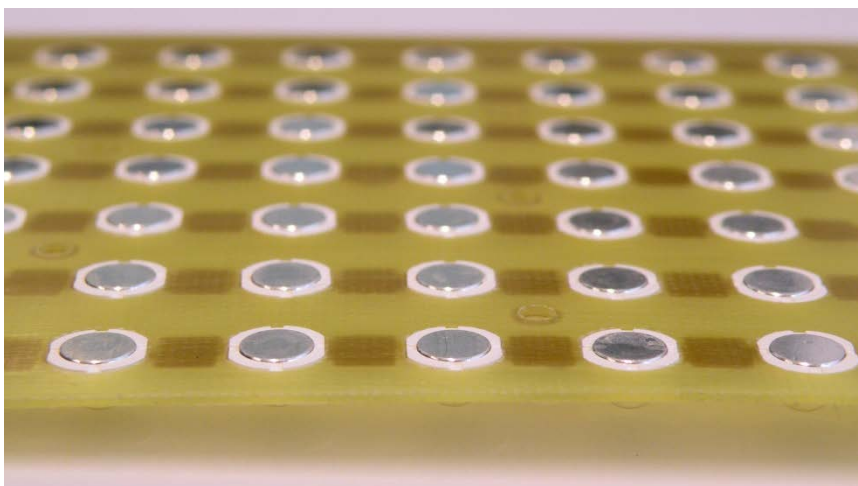


Fig. 46. Detalle parte inferior de la placa



Fig. 47. Montaje final

### Anexo III Caracterización eléctrica experimental de la curva del diodo

Al contrario de lo que sucede con la información facilitada por Cree, se observa que la información facilitada por Multicomp respecto al diodo utilizado en la plataforma experimental no coincide con la información obtenida en el laboratorio. En consecuencia, se ha procedido a obtener esta información por medios experimentales.

-Montaje para la caracterización experimental de la curva V-I del diodo:

- Se utiliza una cadena de 13 LEDs Multicomp tipo 703-0142 5000K de 1W, conectados en serie.
- Se disponen sobre un radiador de elevada inercia térmica
- Se aplica progresivamente una tensión creciente y se mide la característica V-I.
- Cuando se alcanzan una corriente de 400mA con una tensión en 39,53V, ésta se mantiene constante y se espera a que el sistema alcance su equilibrio térmico.
- La gráfica adjunta muestra los valores obtenidos por cada diodo.

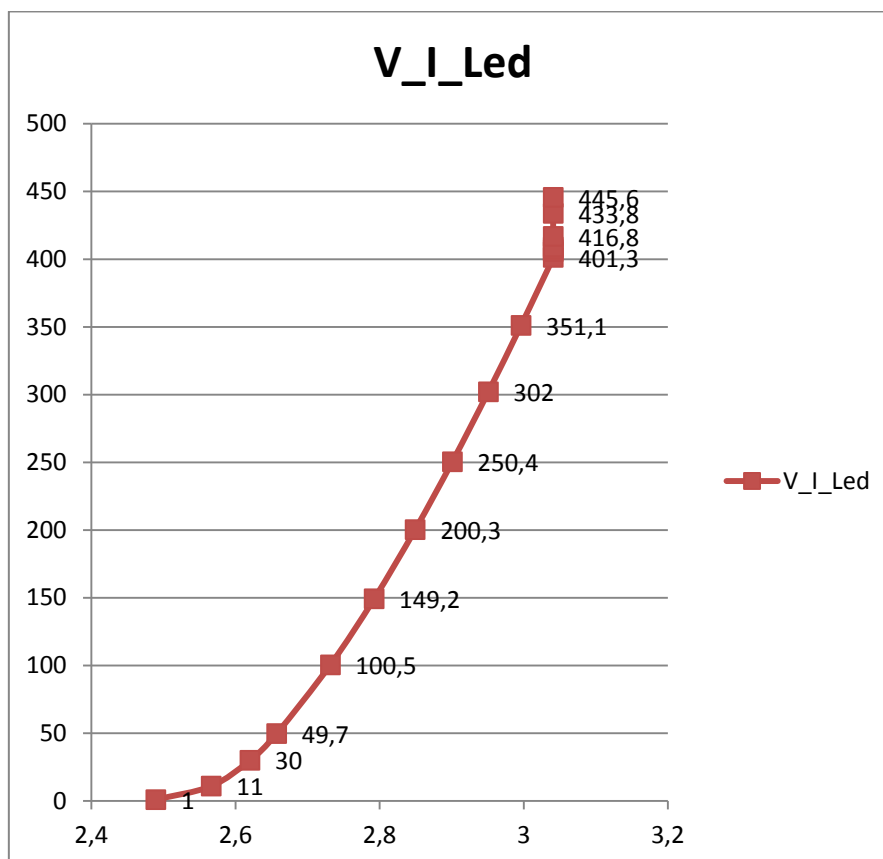


Fig. 48. Relación V-I diodo

- Cuando se alcanza el estado estacionario se toma una foto térmica como indica la Fig. 49.

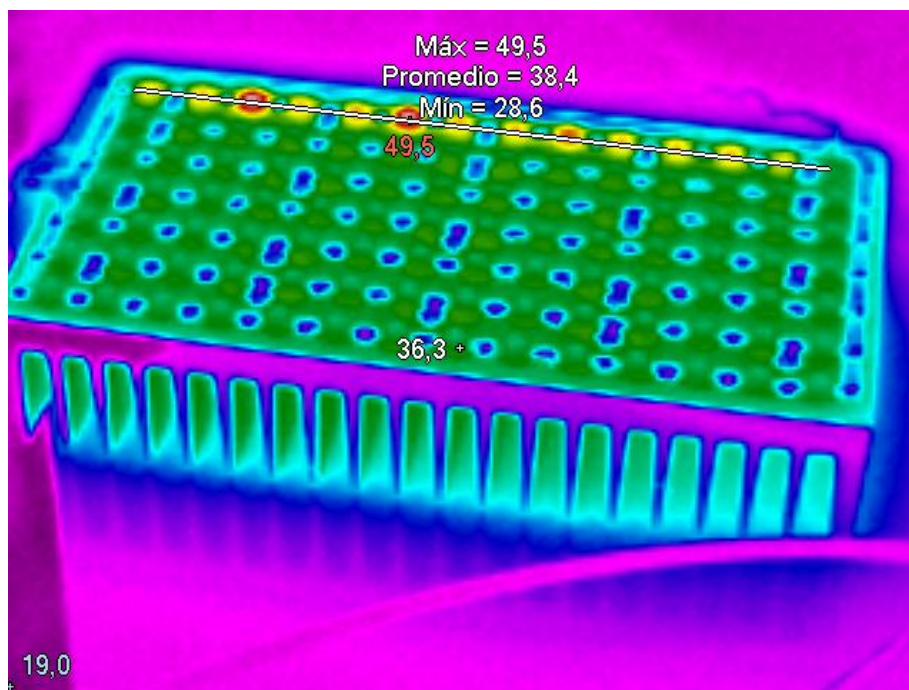


Fig. 49. Imagen termográfica del prototipo

Tabla VIII. Detalle de temperatura según zona

Zona	Temperatura
Punto central	36,3°C
Más caliente	49,5°C
Más Frío	19,0°C

El perfil de temperaturas mostrado a lo largo de la línea de la Fig. 49 se muestra en la Fig. 50.

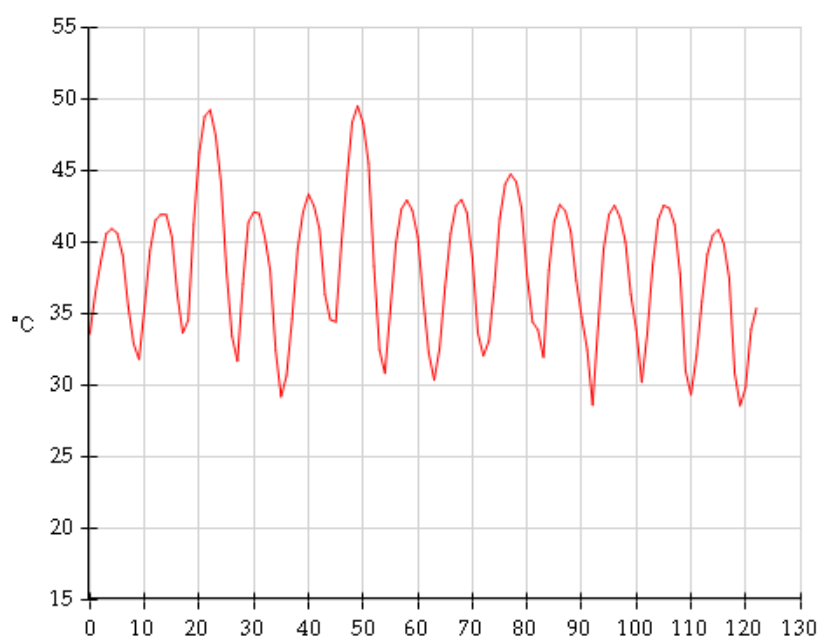


Fig. 50. Perfil de temperaturas de la línea en la termografía

- g) Con una temperatura media de cápsula de 38,4°C se ajusta una curva de diodo que pase por el punto (39,53V, 445,6mA). Hay que tener en cuenta la temperatura de la unión que se obtiene mediante cálculo teniendo en cuenta la potencia disipada y la resistencia térmica ( $R_{th}=15^{\circ}\text{C/W}$ ) dada por el fabricante.
- h) La gráfica resultante se muestra en la Fig. 51 siguiente con una temperatura de unión de  $T_j=108,77^{\circ}\text{C}$ .

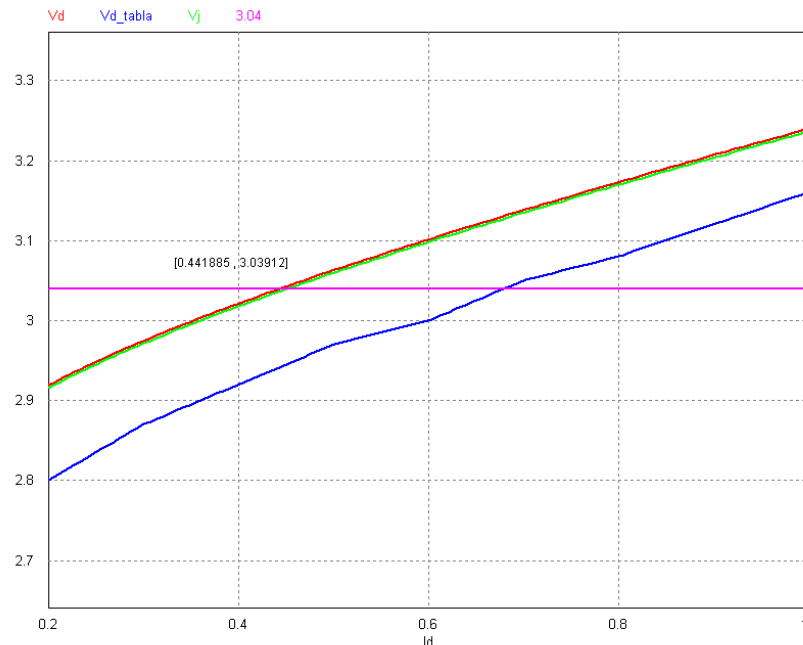


Fig. 51. Característica V-I del diodo Multicomp 1W 703-0142 5000K con una temperatura de capsula de 38,4°C. En rojo: tensión en terminales. En verde: Tensión de la unión. En azul: comparación con la tensión entre terminales de un diodo Cree xp-E2 a una temperatura de unión de  $T_j=85^{\circ}\text{C}$

- i) Los resultados del ajuste son

$$ni = 3$$

Resistencia serie

$$Rs = 248E - 3\Omega$$

Resistencia paralelo

$$Rp = 1E6\Omega$$

Corriente de saturación inversa a 85°C

$$Is85 = 98E - 16A$$

Coefficiente de Temperatura

$$m0 = 15E - 1$$

Tensión de gap

$$Vg0 = 295E - 2V$$



La dependencia con la temperatura de la unión se muestra en la Fig. 52.

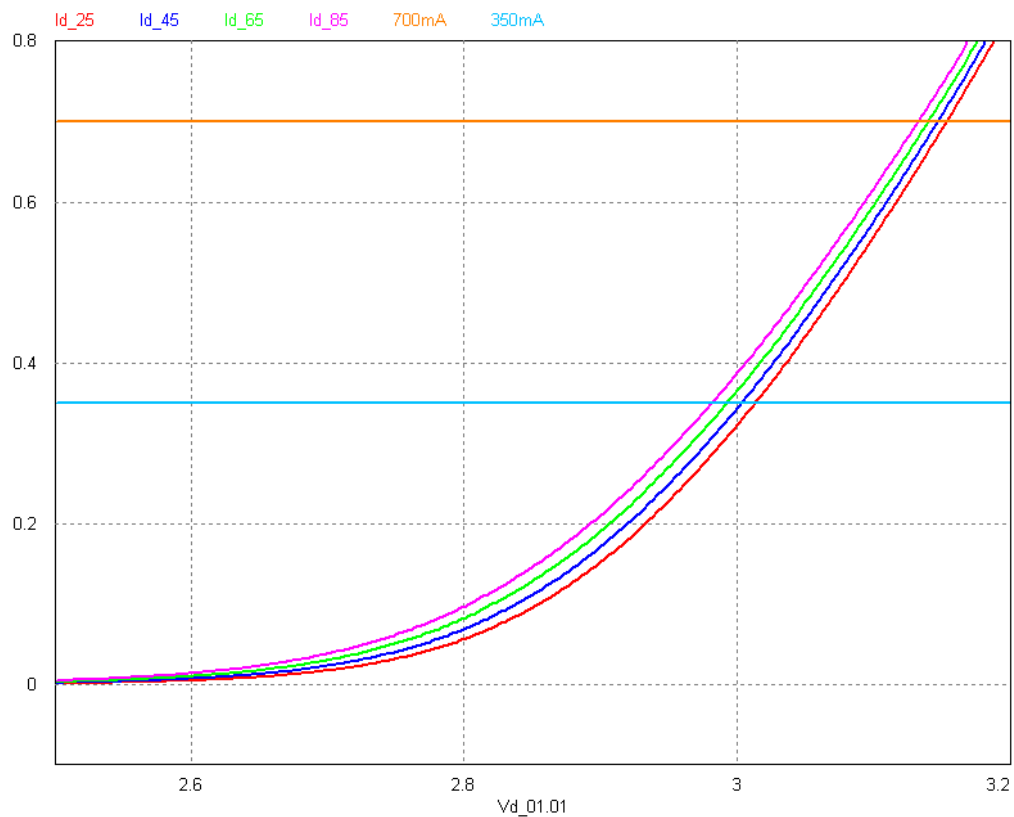


Fig. 52. Curva V-I del diodo en cuatro valores de la temperatura de unión. Naranja: 25°C; Azul: 45°C; Marrón: 65°C; Verde: 85°C.

Se ha incluido dos rectas que representan la corriente nominal de 350A y la corriente máxima de 700mA. El simulador indica que con corrientes de diodo de 700mA, la temperatura de cápsula no puede superar los 85°C al objeto de que la unión no alcance la temperatura máxima de  $T_{j\_max}=120^{\circ}\text{C}$ .

Cuando se monta una luminaria en la que disponen 7 cadenas de LEDs en paralelo con 14 LEDs en serie por cadena, las tensiones extremas con las que tendrá que trabajar la fuente de alimentación con  $I_{Led}=350\text{mA}$ , se obtienen del modelo PSIM. Estas se muestran en la Fig. 54.

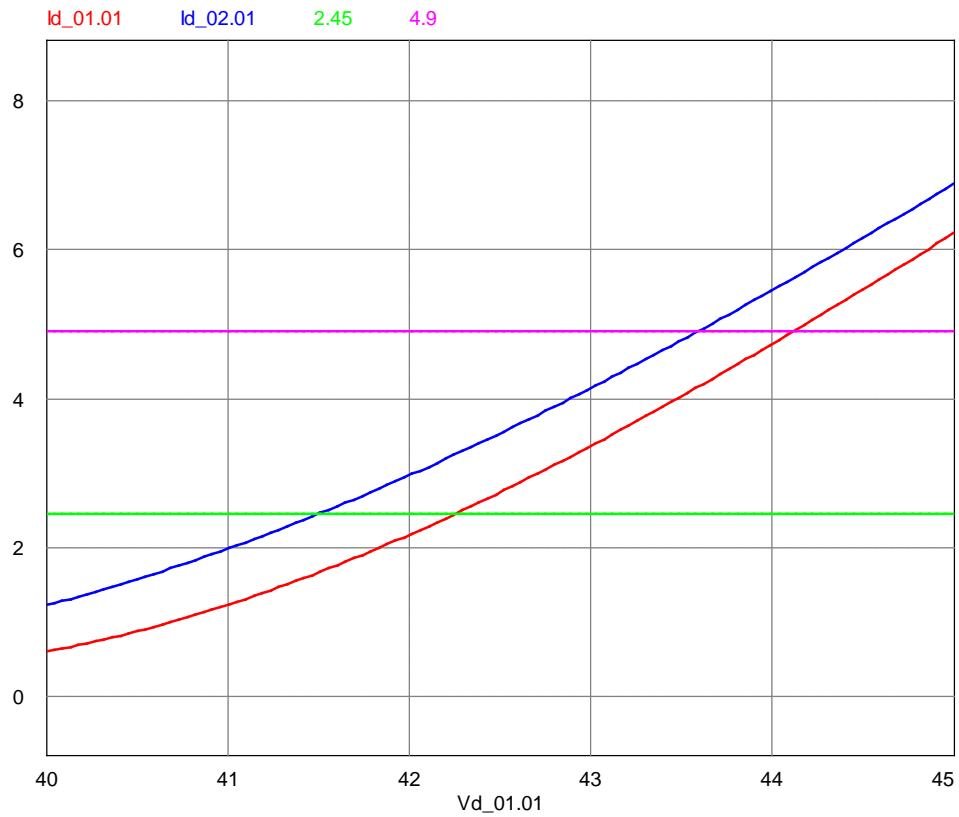


Fig. 53. Variación de la tensión de alimentación cuando la temperatura de cápsula varía entre 0°C (curva en rojo) y 100°C (curva en azul).

Las líneas horizontales marcan una corriente de 350mA por diodo (2,45A en luminaria) y 700mA por diodo (4,9A en luminaria). Con corrientes de LED de 350mA la tensión varía entre 41,9V -42,26V. Con corrientes de LED de 700mA, la tensión varía entre 43,57V-44,1V

Cuando la temperatura de la capsula se mantiene constante, la temperatura de la unión depende de la corriente que alcanza el diodo. La Fig.54 muestra esta dependencia. Se observa que con corrientes de 700mA la temperatura límite de la capsula no puede superar los 85°C

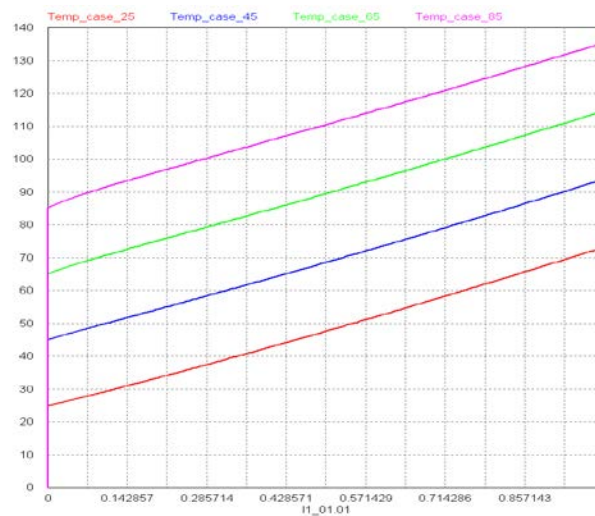


Fig. 54. Dependencia de la temperatura de la unión con la corriente del diodo



## Anexo IV Modelos de simulación en PSIM

### Modelo de simulación en PSIM fuente LLC

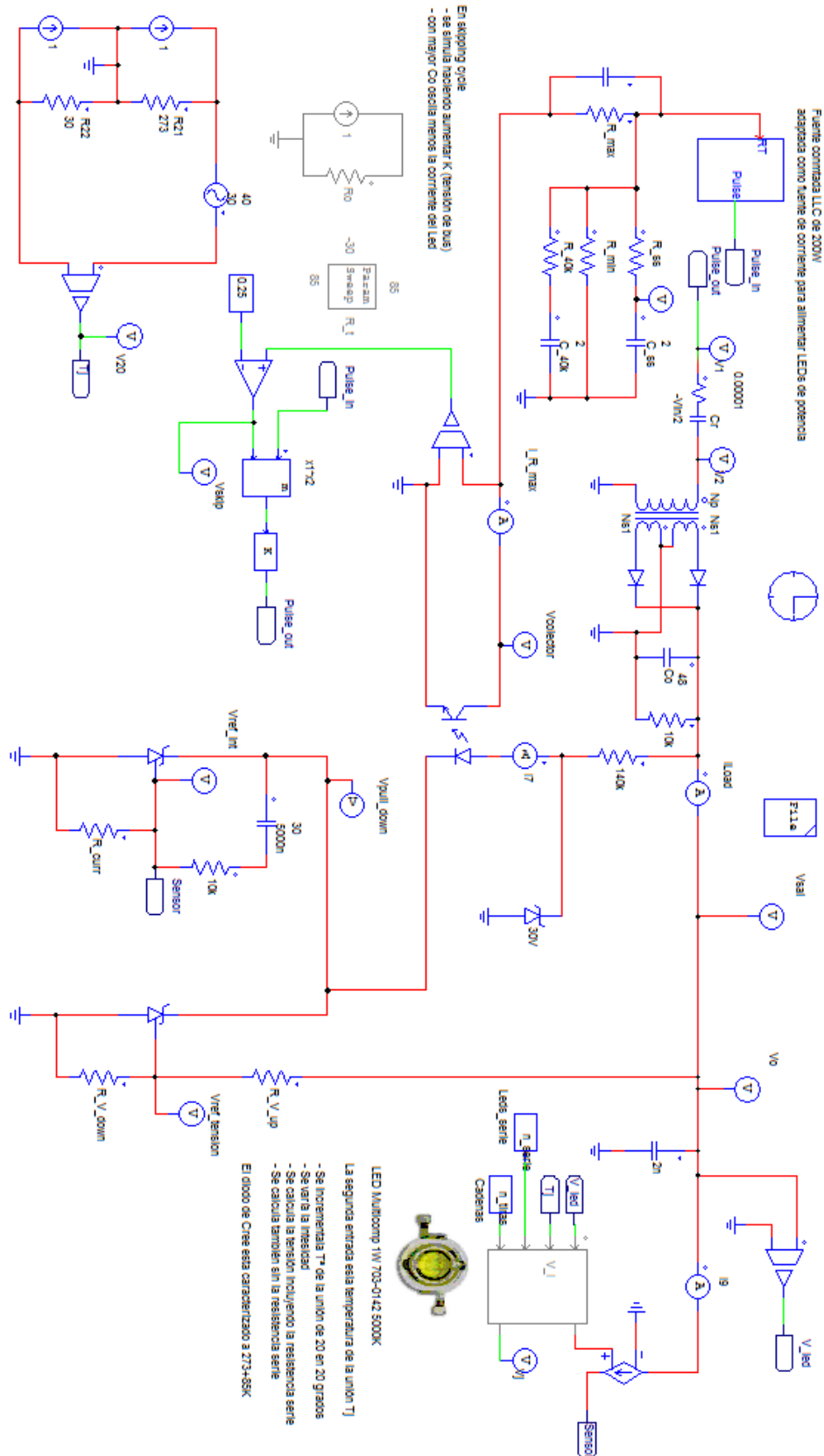


Fig. 55. Esquema PSIM fuente LLC

La Fig. 55 muestra el esquema del circuito implementado en PSIM correspondiente a la fuente LLC resonante. En el esquema se pueden apreciar los dos reguladores shunt, el que controla la corriente máxima de alimentación de la carga y el otro que está configurado para establecer la tensión máxima de salida, limitando la tensión de salida de la fuente en circuito abierto.

La Fig. 56 representa un oscilador controlado por la corriente del terminal  $R_t$ , este terminal tiene una tensión constante de 2V, la intensidad de control se transforma en un nivel de tensión que se integra con un integrador que se inicializa cuando su salida alcanza una tensión preestablecida. Simultáneamente un flipflop D configurado como flipflop T genera una onda cuadrada proporcional a la intensidad del terminal  $R_t$ , esta onda gobierna la frecuencia de la etapa de potencia.

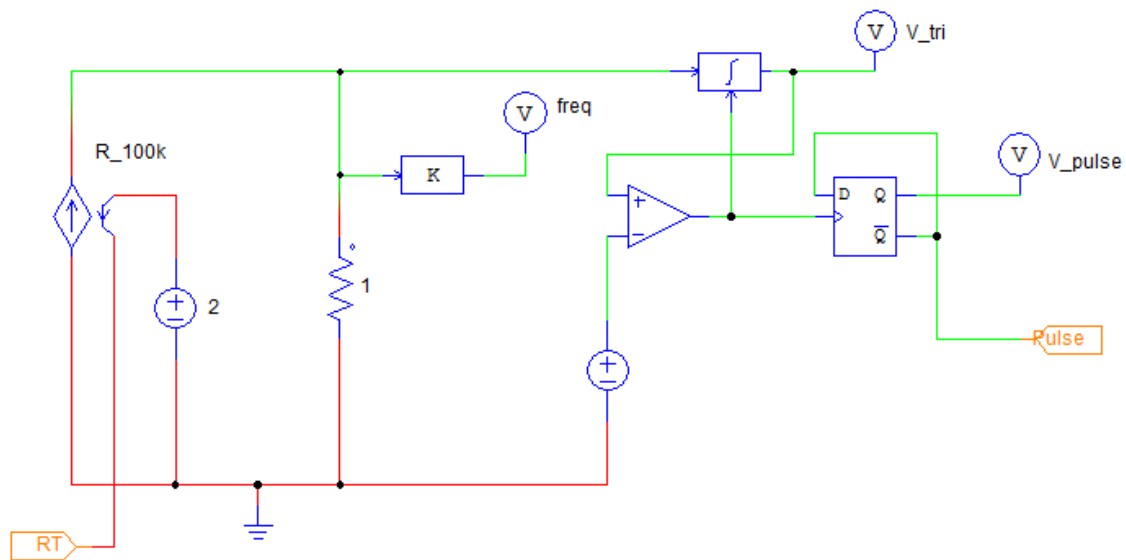


Fig. 56. Esquema PSIM oscilador fuente LLC

## Anexo V Placa prototipo esquemático

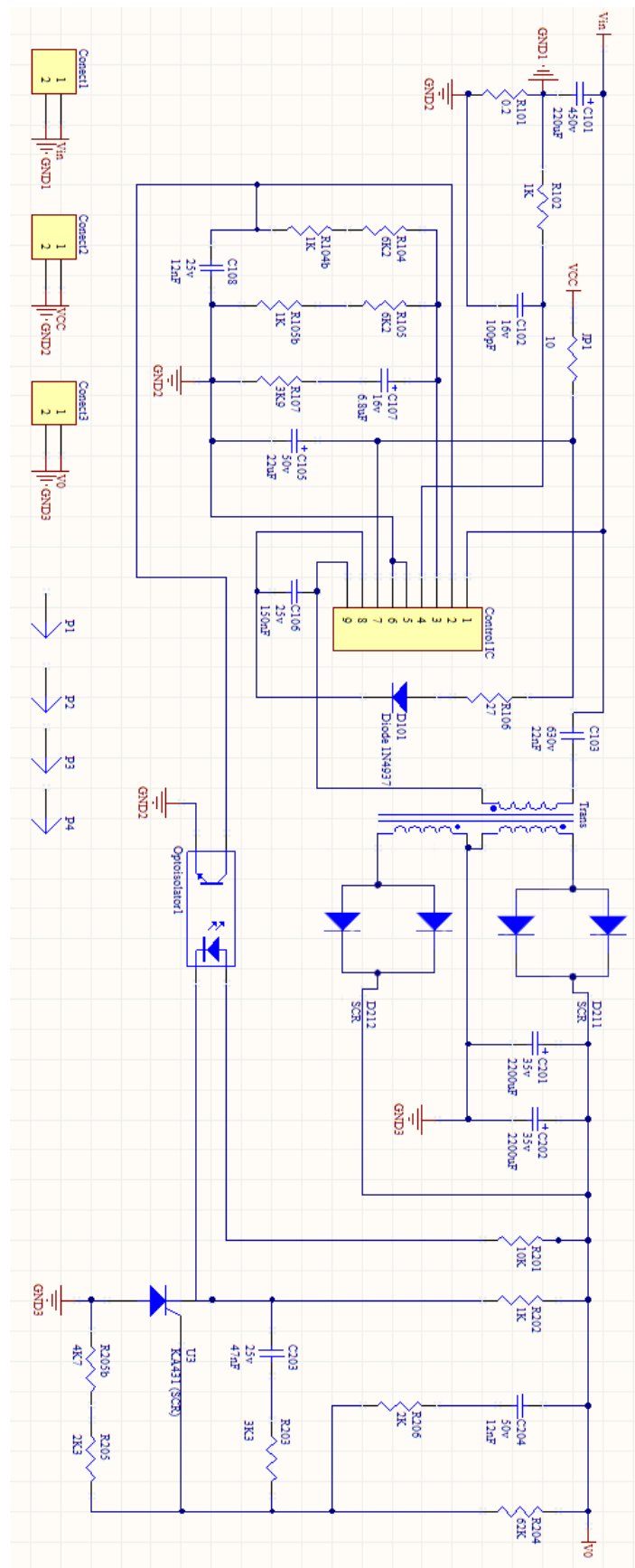


Fig. 57. Esquemático placa prototipo

## Anexo VI Algoritmo en C para la simulación analítica en PSIM del diodo

El código en lenguaje C utilizado en dicha simulación es el siguiente:

```
/*Se utiliza la ecuación del diodo I->V*/  
/*Saturación de la tensión de entrada*/  
long double x_1;  
if (x1>x3*3.86) {x_1=x3*3.86;} else {x_1=x1;};  
/*Tensión de la entrada*/  
double Vd=x_1/x3;  
/*Constantes físicas. Tamaño, nombre, valor*/  
/*No utilizar decimales porque hay error de representación*/  
double K_Boltzman=1380648833E-32;  
double q=160217646E-27;  
double ni=3 ;  
double Rs=400E-3;  
double Rp=1e6;  
/*Corriente de saturación inversa a 25*/  
double Is25=40e-21;  
double Tj25=273+25;  
/*Coeficiente de Temperatura*/  
double m0=15E-1;  
/*Tensión de gap de la unión InGaN a 300K */  
double Vg0=240E-2;  
/*Entradas:  
x1=Tensión aplicada a la cadena de LEDs  
x2=Temperatura de la unión Tj  
x3=Número de LEDs conectados en serie  
x4=Número de cadenas en paralelo*/  
/*Cálculos de constantes*/
```

```

double K_T=K_Boltzman*x2/q;

double K_T25=K_Boltzman*Tj25/q;

/*Calculo previo del exponente*/

long double E_xpo=(-Vg0/ni)*((1/ (K_T+K_T25/10000))-(1/ K_T25));

/*Corriente de saturación con Tj*/

long double Iss=Is25*pow((x2/Tj25),m0)*exp(E_xpo);

/*Corriente del diodo*/

long double I_j(long double Vj)

{ /*Calculo previo del exponente*/

long double E_xpo2=Vj/(ni*(K_T+K_T25/10000));

long double Ij=Iss*(exp(E_xpo2)-1);

return(Ij); };

/*Desarrollo del algoritmo que calcula la tensión de la unión Vj a partir de la tensión de
alimentación Vd*/

/*Tensión inicial de la unión*/

double Vj=Vd;

long double io=I_j(Vj);

long double V1=Vd+Rs*io;

long double Vdelta=0.0001;

while ((V1-Vd)>Vdelta)

{ Vj=Vj-Vdelta;

V1=Vj+Rs*I_j(Vj); };

long double curr;

if (I_j(Vj)>3) {curr=3;} else {curr=I_j(Vj)};

/*Salidas*/

/*Corriente de la cadena de diodos*/

y1 =x4*curr;

y2=x3*V1;

```

## Anexo VII Modelo PSIM caracterización analítica del LED

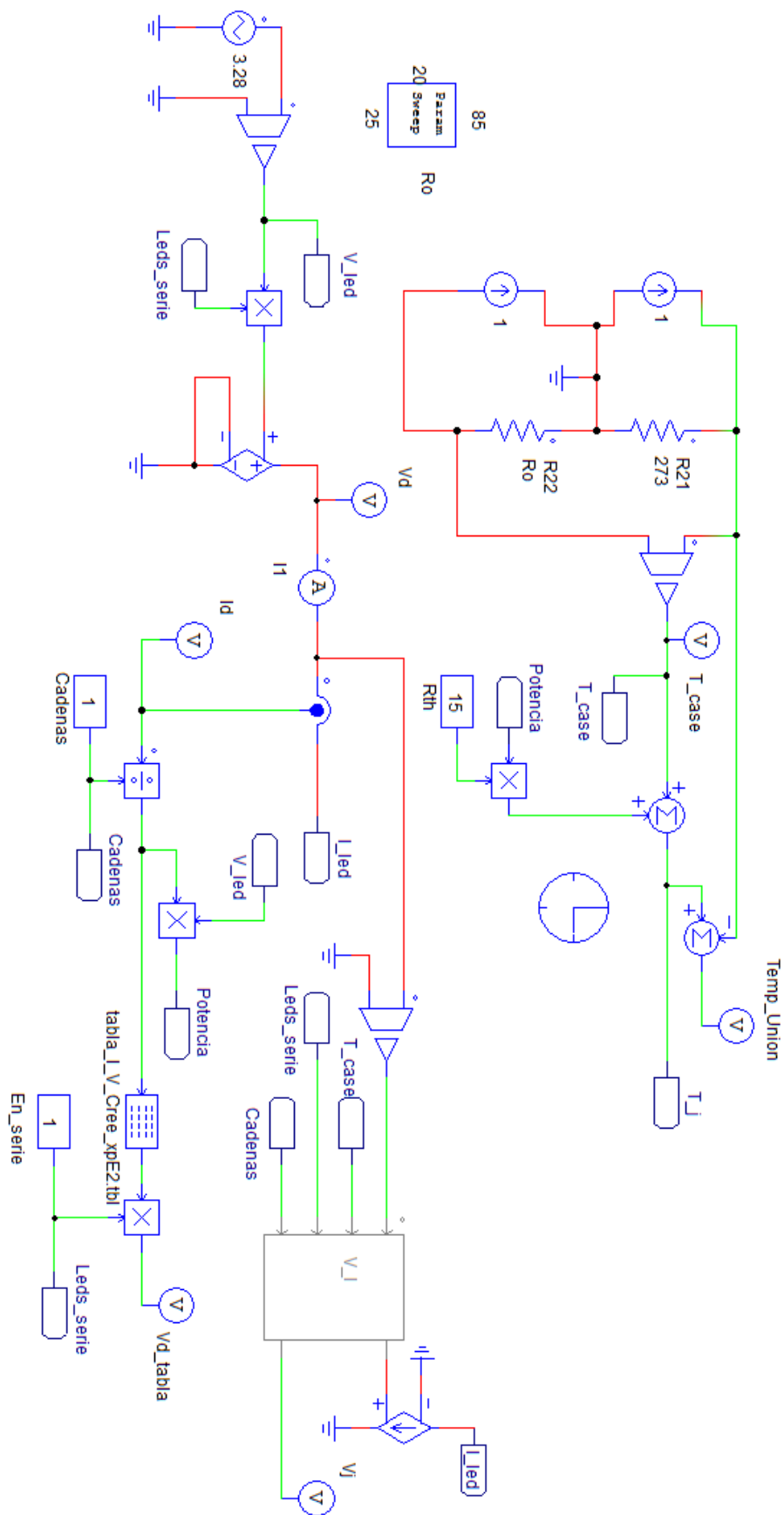


Fig. 58. Modelo PSIM caracterización analítica del LED

## Bibliografía

- [1] Sitio web de la Technology Academy Finland,  
<http://www.technologyacademy.fi/millennium-technology-prize/>.
- [2] Sitio web de Philips alumbrado, <http://www.lighting.philips.es>.
- [3] Pike research, Research Report: Energy Efficient Lighting for Commercial Markets,  
<http://www.pikeresearch.com/wordpress/wp-content/uploads/2011/11/EEL-11-Executive-Summary.pdf>.
- [4] Pike Research, <http://www.pikeresearch.com>.
- [5] Commission Internationale de l'Éclairage, CIE 17.4-1987 ISBN 978 3 900734 07 7.
- [6] LEDs magazine, Cree demonstrates 170-lm/W LED retrofit lamp in lab,  
<http://ledsmagazine.com/news/9/8/1>.
- [7] Multicomp, Datasheet diodo LED Multicomp 703-0142.
- [8] National Semiconductors, Power Integrations, Texas instruments, Linear Technology, On Semiconductor, Datasheet correspondiente.
- [9] Sitio web Farnell, Imagen de producto LT3799,  
<http://es.farnell.com/productimages/nio/standard/4745681.jpg>.
- [10] Linear Technology, Datasheet integrado LT3799.
- [11] Fairchild Semiconductor, Application Note AN-4151.
- [12] Department of Electrical Engineering, Chien-Hsuan Chang, Hung-Liang Cheng, En-Chih Chang, Chun-An Cheng and Hung-Yi Chen, , 7th. Conf. on Industrial Electronics and Applications (ICIA) 2012 P.654-658, Modeling and design of the LLC resonant converter used in solar array simulator.
- [13] R.L. Steigerwald, IEEE Trans. Power Electron., Vol.3, p.174-182, Apr. 1988, A comparison of half-bridge resonant converter topologies.
- [14] IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL 28, NO.9 2013, An Analytical Steady Model of LCC type Series-Parallel Resonant Converter with Capacitive Output Filter.
- [15] Robert N. Buono, Electronic Design, Feb. 7, 2000.